

ACTA FORESTALIA FENNICA

183

ERÄIDEN MATEMAATTISEN OHJELMOINNIN
MENETELMIEN KÄYTTÖ PUUN KORJUUN JA
KULJETUKSEN SEKÄ TEHDASKÄSITTELYN
MENETELMÄVALINNAN APUVÄLINEENÄ

*THE USEFULNESS OF SOME TECHNIQUES OF THE
MATHEMATICAL PROGRAMMING AS A TOOL
FOR THE CHOICE OF TIMBER HARVESTING
SYSTEM*

Esko Mikkonen



SUOMEN METSÄTIETEELLINEN SEURA 1983

Suomen Metsätieteellisen Seuran julkaisusarjat

ACTA FORESTALIA FENNICA. Sisältää etupäässä Suomen metsätaloutta ja sen perusteita käsitteleviä tieteellisiä tutkimuksia. Ilmestyy epäsäännöllisin väliajoin niteinä, joista kukin käsittää yhden tutkimuksen.

SILVA FENNICA. Sisältää etupäässä Suomen metsätaloutta ja sen perusteita käsitteleviä kirjoitelmia ja lyhyehköjä tutkimuksia. Ilmestyy neljästi vuodessa.

Tilaukset ja julkaisuja koskevat tiedustelut osoitetaan seuran toimistoon, Unioninkatu 40 B, 00170 Helsinki 17.

Publications of the Society of Forestry in Finland

ACTA FORESTALIA FENNICA. Contains scientific treatises mainly dealing with Finnish forestry and its foundations. The volumes, which appear at irregular intervals, contain one treatise each.

SILVA FENNICA. Contains essays and short investigations mainly on Finnish forestry and its foundations. Published four times annually.

Orders for back issues of the publications of the Society, and exchange inquiries can be addressed to the office: Unioninkatu 40 B, 00170 Helsinki 17, Finland. The subscriptions should be addressed to: Academic Bookstore, Keskuskatu 1, SF-00100 Helsinki 10, Finland.

ERÄIDEN MATEMAATTISEN OHJELMOINNIN MENETELMIEN KÄYTTÖ PUUN KORJUUN JA KULJETUKSEN SEKÄ TEHDAS- KÄSITTELYN MENETELMÄVALINNAN APUVÄLINEENÄ

Esko Mikkonen

THE USEFULNESS OF SOME TECHNIQUES OF THE MATHEMATICAL PROGRAMMING AS A TOOL FOR THE CHOICE OF TIMBER HARVESTING SYSTEM

MIKKONEN, E. 1983. Eräiden matemaattisen ohjelmoinnin menetelmien käyttö puun korjuun ja kuljetuksen sekä tehdaskäsitelyn menetelmävalinnan apuvälineenä. Abstract: The usefulness of some techniques of the mathematical programming as a tool for the choice of timber harvesting system. Acta For. Fenn. 183: 1-110.

Tutkimuksessa tarkastellaan viiden matemaattisen ohjelmoinnin menetelmän, nimittäin standardin lineaarisen optimoinnin, parametrisen optimoinnin, tavoiteoptimoinnin, sekaluukuoptimoinnin ja kokonaisluukuoptimoinnin, käyttömahdollisuuksia puunhankinnan suunnittelun työkaluna.

Teoreettiselta kannalta tavoiteohjelmointi näyttäisi soveltuvan parhaiten puunhankintaongelmien matemaattisen käsittelyn rutiiniksi. Rutiiniin tulisi sisällyttää riittävän laajat jälkianalyysimahdollisuudet muuttujien parametrisointiin. Jos on tarpeen tarkastella erimittaisia suureita, menetelmän heikkoutena on taloudellisen informaation hämäryys. Toinen heikkous on, että menetelmä ei mahdollista eri tavoitteiden hierarkian objektiivista määrittämistä, joka riippuu päätöksentekijöiden subjektiivisista preferensseistä.

Käytännön sovellutusten kannalta paras menetelmä on standardi lineaarinen optimointi, jos tavoitteita kuvaava funktio on yksiselitteisesti muotoiltavissa esimerkiksi taloudellisin termein. Jos on useita tavoitteita, paras menetelmä myös käytännössä on tavoiteoptimointi.

Osatutkimusten perusteella voidaan todeta, että mikä tahansa tarkastelluista menetelmistä soveltuu puunhankinnan kustannusten minimointitehtävän suorittamiseen. Siinä parhaita ovat tavoiteohjelmointi ja standardi lineaarinen optimointi. Menetelmien kehittämiseen on paras parametrisen optimointi, sillä se mahdollistaa laaja-alaiset kustannustarkastelut halulla kustannusvälillä. Investointien suunnittelun paras menetelmä on sekaluukuohjelmointi binääristen päätösmuuttujien avulla. Tällöin mallia ei pidä paisuttaa tarpeettoman suureksi.

Matemaattinen ohjelmointi soveltuu sitä paremmin myös metsällisten ongelmien ratkaisemiseen, mitä moniulotteisempi ja rajoitetumpi toimintaympäristö on. Mallien antamia tuloksia tulkittaessa on aina pidettävä mielessä, että

- mallit ovat aina laatijoittensa näkemyksiä kyseisestä ongelma-alueesta
- mallit yksinkertaistavat vallitsevaa todellisuutta
- sinänsä looginen ja aukoton järjestelmä kiteyttää tiedon muutamiksi päätösmuuttujiksi. Seurauksena on, että mikäli perustiedot eivät ole luotettavia, myöskään tulokset eivät päde.

The applicability of five mathematical programming methods, namely standard linear programming, parametric programming, goal programming, mixed integer programming and integer programming is discussed as a planning tool for the choice of wood procurement method.

Theoretically, the goal programming approach seems to be the best routine for mathematical handling of problems related to wood procurement. The parametric approach must include enough large postoptimality analysis routine. If the effect of the variables expressed with different measures is to be studied, interpretation of the economic information given by the approach becomes a problem. The other drawback is that the approach does not allow determination of the hierarchy of the goals objectively as they depend on the subjective preferences of the decision makers.

From the practical point of view, standard linear programming is the best method if the objective function can be formulated in economic terms, for instance. If there are several goals to be attained or satisfied the best method is goal programming.

According to the substudies, every method under consideration can be used as a solution routine for the minimization of wood procurement costs. In cost minimization the best methods are goal programming and standard linear programming. The best method for harvesting system evaluation purposes is parametric programming because it allows varied cost calculations within a certain cost range. The best method for harvesting equipment investment planning is mixed integer programming with binary decision variables. The model should not be expanded to too much, however.

The more complicated and restricted the problem environment is, the better the mathematical programming approach will be, also in harvesting related problems. In the interpretation of the results given by the models, the following facts should be borne in mind.

- models are always subject to the model makers' individual interpretation of the problem
- models always simplify the prevailing reality
- as such a logical and perfect formulation of the problem compresses the information into few decision variables. Consequently, if the basic data fed into the model are not correct, the results will not be correct either.

ODC 308--015.5+311+63+661
ISBN 951-651-058-2

Arvi A. Karisto Oy:n kirjapaino
Hämeenlinna 1983

SISÄLLYSLUETTELO

A TEOREETTINEN OSA	5
1 JOHDANTO	7
2 TUTKIMUSTEHTÄVÄ JA SEN RAJAUS	8
3 KIRJALLISUUSKATSAUS	9
3.1 Matemaattisen optimoinnin tärkeimmät puunhankintasovellutukset muissa maissa	9
3.2 Matemaattisen optimoinnin käyttösovellutukset Suomen metsätaloudessa	10
4 HYVÄN SUUNNITTELUALGORITMIN VAATIMUKSET	11
5 PUUN KORJUU-, KULJETUS- JA KÄSITTELYONGELMAN YLEINEN KUVAUS	12
5.1 Yleistä	12
5.2 Tutkimusongelman mallittaminen	13
5.3 Tarkasteltavat menetelmät	14
5.3.1 Lineaarimallien alkuolettamukset	14
5.3.2 Standardi lineaarinen optimointi	14
5.3.3 Parametrisen optimointi	15
5.3.4 Tavoiteoptimointi	16
5.3.5 Kokonais- ja sekaluukuoptimointi	17
6 MENETELMIEN ARVIOINTI	20
6.1 Soveltuvuus teoreettiselta kannalta	20
6.2 Soveltuvuus käytännön kannalta	22
7 PÄÄTELMÄT OSATUTKIMUKSISTA	24
8 YHDISTELMÄ JA JATKOSELVITYKSET	26
9 KIRJALLISUUSLUETTELO	27
B EMPIIRINEN OSA	31
PUUTAVARAN KASAUKSEN KEHITTÄMISEN VAIHTOEHDOT	33
SAHAPUUN OPTIMAALISEN KORJUUMENETELMÄN VALINTA	67
PUUNKÄSITTELYASEMAN PERUSTAMISEN KANNATTAVUUS	95

SYMBOLIEN SELITYKSET

V_M = puuraaka-aineen metsävarastot	a_{ij} = matriisin A alkiot
V_{KI} = puuraaka-aineen kuljetusvarastot	x = muuttujajoukkoa kuvaava vektori
V_{TP} = puuraaka-aineen tehdasvarastot	x_{jk} = muuttuja l. aktiviteetti
L_j = puuraaka-aineen lähteet	b = rajoitusyhtälöiden muodostaman ongelma-avaruuden raja-arvot sisältävä vektori
H_i = korjuussa käytettävät menetelmävaihtoehdot	c^T = muuttujien kustannuskertoimista muodostettu pystyvektori
K_m = kaukokuljetuksen vaihtoehdot	x_B = kannassa olevien muuttujien vektori
T_r = puunkäsitelyn vaihtoehdot tehdaslaitoksella	B = kantamuuttujien kerroinmatriisi
P_i = jalostusprosessit tuotantolaitoksella	I = yksikkömatriisi
C_k = korjuun kustannukset menetelmittäin k	N = kantaan kuulumattomien muuttujien kerroinmatriisi
C_c = kuljetusvarastoinnin kustannukset vaiheittain l	x_B^* = optimaalinen kantaratkaisun muuttujavektori
C_m = kaukokuljetuskustannukset vaihtoehdoittain m	B^{-1} = kantamuuttujien käänteismatriisi
C_p = tehdasvarastoinnin kustannukset tavoittain p	c_B = kantaan kuuluvien muuttujien kustannuskerroinvektori
C_i = tehdaskäsitelyn kustannukset vaihtoehdoittain r	
C_i = jalostusprosessien t kustannukset	
Z = tavoitefunktion arvo jossain mielivaltaisessa ongelma-avaruuden kärkipisteessä	
Z^* = tavoitefunktion optimaalinen arvo	
A = ongelma-avaruuden rajoituskertoimien muodostama matriisi	

ESIPUHE

Ajatus käsillä olevan tutkimuksen suorittamisesta erillisestä käytännön puunkorjuuta 1979–1980 W. K. Kellogg -säätiön stipendiaattina Oregon State Universityssä, Yhdysvalloissa.

Tutkimus kokonaisuutena muodostuu kolmesta erillisestä käytännön puunkorjuuta ja sen kehittämistä tarkastelevasta osatyöstä sekä näissä käytettyjen tutkimusmenetelmien teoreettisesta tarkastelusta.

Kasauksen kehittämistutkimus tehtiin Metsätehossa, jossa LuK Airi Eskelinen laati korjuun simuloinnin tietokonesovellutuksen ja LuK Jaako Peltonen LP-mallin atk-toteutuksen. Professorit Matti Keltikangas ja Kalle Putkisto Helsingin yliopistosta antoivat varteenotettavia ohjeita ja neuvoja tutkimuksen kestäessä. Eemil Aaltosen säätiö tuki taloudellisesti tätä osatutkimusta.

Sahapuun korjuun menetelmävalintaa käsittelevään osatutkimukseen sain virikkeitä ja opastusta operaatiotutkimuksen menetelmien opettajiltani Oregon State Universityssä. Erityisesti mainittakoon sovelletun matematiikan apulaisprofessori David A. Butler, professori Tom West Industrial Engineering Departmentista ja metsäteknologian professori Eldon Olsen. Oregon State Universityn las-kentakeskus mahdollisti osaltaan tutkimuk-

sen suorituksen myöntämällä apurahan tietokoneajojen suorittamiseksi.

Puunkäsittelyasemaa koskevassa tutkimuksessa antoivat tehdasprosessien asiantuntijoina auliisti apuaan dipl.ins. Aarre Metsävirta, ins. Martti Lamberg ja puunkäsittelyn asiantuntija metsänhoitaja Juha Rautanen A. Ahlström Osakeyhtiöstä.

Tutkimuksen teoreettisen osan laatimisen sekä sen muokkaamisen käsillä olevaan muotoon on mahdollistanut Kulttuurirahaston Uudenmaan aluerahaston ja Osuuspankkijärjestön Kyösti Haatajan säätiön myöntämä taloudellinen tuki.

Tutkimusraportin on kirjoittanut puhtaaksi yo Erja Luomanmäki.

Haluan kiittää kaikkia yllä mainittuja henkilöitä, laitoksia ja yhteisöjä myötämielisestä panoksestaan tämän tutkimuksen toteuttamisessa ja perhettäni sen kestäessä osoittamastaan pitkämielisyydestä.

Suomen Metsätieteellinen Seura on hyväksynyt tutkimuksen julkaisusarjaansa, mistä esitän sille erityisen kiitokseni.

Tuusula, toukokuussa 1983

Esko Mikkonen

A TEOREETTINEN OSA

Teoreettisessa osassa asetetaan puunhankinnan hyvän suunnittelualgoritmin vaatimukset ja tarkastellaan standardin lineaarisen optimoinnin, parametrisen optimoinnin, tavoiteoptimoinnin, sekalukuoptimoinnin ja kokonaislukuoptimoinnin käyttömahdollisuuksia puunhankinnan suunnitteluvälineenä sekä teoreettiselta että käytännön kannalta.

Kaikki tarkasteltavat suunnittelualgoritmit täyttävät kvantitatiivisuuden, käyppyyden ja kokonaisoptimaalisuuden vaatimukset. Teoreettiselta kannalta tavoiteoptimointi näyttäisi soveltuvan parhaiten puunhankinnan suunnittelumenetelmäksi. Kaikki tarkasteltavat menetelmät ovat kuitenkin samaa malliperhettä ja siten yhdisteltävissä. Tavoiteoptimointiin tulisikin sisällyttää kokonaislukujen käyttömahdollisuus ja laajat parametriset jälkianalyysimahdollisuudet. Vaikeimmaksi pulmaksi jäisi vain erimitallisia suureita käytettäessä syntyvä taloudellisen informaation tulkintavaikeus.

Käyttäjän kannalta parhaimmat menetelmät ovat tavoiteoptimointi ja standardi lineaarinen optimointi. Jälkimmäisen suurin heikkous on sen yksipuolisuus ongelman kuvauksessa, edellisen heikkous taas se, että eri tavoitteiden arvojärjestys on pitkälti käyttäjän subjektiivisten arvostusten varassa.

1 JOHDANTO

Puunhankinnan, puunkorjuun ja -kuljetusten suunnittelu on siirtymässä Suomessa uuteen kehitysvaiheeseen. Tähän on vaikuttamassa pääasiassa kaksi ilmiötä: toisaalta puunhankintaa suorittavien organisaatioiden asteittainen muuttuminen linjaorganisaatioista toiminnallisesti hajautetuiksi tulosvastuullisiksi organisaatioyksiköiksi (Keipi 1978, Peltonen 1981, Pukkila 1982) joko alue- tai piiritasolla ja toisaalta informaatio- ja tietojenkäsittelytekniikan nopea kehitys ja sen seurausvaikutukset yritysten metsäosastojen päätösten tukena olevien tietojen käsittelyssä (Eskelinen ja Peltonen 1980, Peltonen 1981).

Puunkorjuun nykyaikaisten suunnittelujärjestelmien luominen ja kehittäminen alkoi pohjoismaissa 1960-luvun lopulla (Väisänen 1967 a, Carlsson 1968, Lönner 1968, Andersson 1971, Peltonen ja Väisänen 1972). Se johti Suomessa käyttökelpoisiin, laajemmassa mitassa sovellettavissa oleviin järjestelmiin vasta tietojenkäsittelyn hajautuksen myötä yli kymmenen vuotta myöhemmin (Peltonen 1981). Tähän mennessä kehitetyille hajautetuille käytännön puunkorjuun suunnittelu- ja ohjausjärjestelmille ja niissä toistuvasti käytettäville suunnittelumalleille on ollut ominaista, että niihin ei ole yleensä sisällytetty optimointirutiineja. Tavoitteena on ollut pikemminkin luoda tehokkaita ja nopeita ajantasajärjestelmiä, joiden avulla saadaan laske- tuksi käytettävissä olevat puunkorjuu- ja kuljetusvaihtoehdot suunnittelua ja päätöksente- koa varten.

Leimikoiden oston, pystymittauksen ja suunnittelun eri vaiheissa kerätään suuri määrä sellaista tietoa, joka suoraan tai välillisesti palvelee puunkorjuun ja kuljetusten suunnittelua. Tällaisen taustatiedon entistä parempi hyväksikäyttö on tullut mahdolliseksi uuden tekniikan myötä. Toisaalta uusi tekniikka asettaa entistä suuremmat laatu- ja määräraajatiedot tiedolle, jota kerätään. Kysymys siitä, mitä tietoa hankitaan, kuinka paljon ja millä tarkkuudella, muodostuu siten ensiarvoisen tärkeäksi.

Viime vuosien kehitys matematiikan eri sektoreilla ja aivan erityisesti operaatiotutkimuksen menetelmien ja matemaattisen ohjelmoinnin teorian ja sovellutusten puolella on

ollut valtaisa. Myös tällä alueella tietojen käsittelyn nopeuden ja volyymin moninkertaistumisella ja kustannusten laskulla on ollut keskeinen merkitys uusien sovellutusmahdollisuuksien syntymiselle (Garfinkel ja Nemhauser 1972, Taha 1972, Shamblyn ja Stevens 1974, Zionts 1974, Salkin 1975, Lokki 1978, Williams 1979, Hillier ja Lieberman 1980).

Operaatiotutkimuksen menetelmien soveltamista metsälliseen ympäristöön erityisesti metsien käsittelyn puolella on harrastettu runsaasti. Kirjallisuudesta löytyy yli 600 tällaista sovellutusta. Puunhankinnan ja puunkorjuun suunnittelun ja käytännön puolella tutkimuksia ovat tehneet ja sovellutuksia esittäneet mm. Thompson 1968, Ganguli 1970, Seppälä 1971, Field 1973, O'Leary 1973, Peltonen 1973, Dykstra 1976, Newnham 1975 a, 1975 b, Eskelinen ja Peltonen 1977, Louto ja Myllyniemi 1977, Baranovskii 1978, Eskelinen ym. 1978, Goulet ym. 1978, IUFRO 1978, Keipi 1977 ja 1978, Mikkonen 1978 a, 1978 b, Kao ja Brodie 1979, Mikkonen 1980, Eskelinen ja Keskinen 1981, Mikkonen 1982 a. Esitetyt menetelmät ovat olleet paljolti simulointiin perustuvia, mutta muitakin on toki esitelty ja kokeiltu.

Puunhankinnan, puunkorjuun ja -kuljetusten hoitaminen tulevaisuudessa tulee edellyttämään jatkuvasti kasvavaa pääomapanosta (Rysä ym. 1972, Eskelinen ym. 1978, Salmi- nen ja Vesikallio 1978, Vesikallio 1981). Met- sälliset toiminnot lähestyvät enenevästi tek- nis-taloudellisessa mielessä teollista tuotan- toa (Eskelinen ym. 1978, Rationalisierungs- konferensin 1981). Tämän vuoksi suunnitte- lun merkitys niukkojen voimavarojen oikeas- sa kohdentamisessa tulee entisestään korostu- maan.

Toisaalta toiminta tulee tapahtumaan yhä kontrolloidumassa, lisääntyvien määräys- ten ja rajoitusten sekä sopimusten muodosta- massa ympäristössä (Vesikallio 1981). Näissä puitteissa ei ole varaa jättää tutkimatta ja käyttämättä puunhankinnan ja korjuun suunnittelussa kaikkia niitä uusia menetelmiä ja malleja (vrt. Mikkonen 1982 b), jotka edes- auttavat varhempaa paremman tuloksen saa- vuttamisessa aiempaa tehokkaammin.

2 TUTKIMUSTEHTÄVÄ JA SEN RAJAUS

Tässä tutkimuksessa kartoitetaan teoreettiselta ja käytännön kannalta viiden matemaattisen ohjelmoinnin menetelmän ominaisuudet ja käyttömahdollisuudet puunkorjuun ja kuljetuksen sekä tehdaskäsittelyn edullisimpien menetelmien suunnittelu- ja valintametodina.

Tarkasteltavat matemaattisen ohjelmoinnin menetelmät ovat lineaarinen ohjelmointi, parametrinen ohjelmointi, tavoiteohjelmointi, sekalukuohjelmointi ja kokonaislukuohjelmointi. Lähtöolettamuksena on, että puurakka-aineen käsittely metsän ja jalostusprosessin välillä voidaan kustannustasolla kuvata lineaarisella tai siksi palautuvalla mallilla, mikä oletamus ei välttämättä pidä paikkaansa. On myös olemassa suuri joukko muita analyttisiä menetelmiä (liitekuva 1, s.29), joiden avulla mitä moninaisimpia ongelmia puunkorjuussa voitaisiin mallittaa ja ratkaista, mutta ne jätetään tämän tarkastelun ulkopuolelle. Esimerkkinä vaikkapa jonoteoria, Markov-ketju ja dynaaminen ohjelmointi. Simuloinnin laajat mahdollisuudet niin ikään jätetään tarkasteluista pois.

Tarkastelujen ulkopuolelle jätetään myös puunhankinnan kaupalliset toiminnot, kuten osto ja vaihtokaupat sekä niiden kytkennät puunkorjuuseen. Kun jatkossa puhutaan

puunhankinnasta, tarkoitetaan lähinnä puunkorjuuta, kuljetusta ja varastointia ilman kaupallisia toimintoja.

Ulkopuolelle jätetään myös varsinainen jalostusprosessi ja siihen liittyvät seikat. Metsäteollisuuden jalostusprosesseista ja siihen liittyvistä malleista on oma laaja kirjallisuutensa.

Ongelma-aluetta tarkastellaan puunhankinnan näkökulmasta ja asetetaan hyvän suunnittelumallin vaatimukset. Tarkastellaan, miten valitut viisi suunnittelumallia algoritmeineen täyttävät asetetut vaatimukset teoreettiselta ja käytännön kannalta.

Selvityksen tuloksia vertaillaan lopuksi kolmen erillisen tutkimustehtävän mallittamisessa saatuihin kokemuksiin. Tämän vertailun perusteella päätellään, miten eri ohjelmointimenetelmät soveltuvat

1. puunkorjuun ja -kuljetuksen kustannusten minimointitehtävän ratkaisemiseen
2. puunkorjuun ja -kuljetuksen menetelmien kehittämisen ja käyttökelpoisuuden arvioinnin apuvälineeksi
3. puunkorjuun, -kuljetuksen ja -käsittelyn koneiden ja laitteiden sekä laitosten investointien suunnittelun apuvälineeksi.

3 KIRJALLISUUSKATSAUS

3.1 Matemaattisen optimoinnin tärkeimmät puunhankintasovellukset muissa maissa

Useimpien operaatiotutkimuksen menetelmien teoreettiset perusteet ja matemaattiset periaatteet ovat olleet tunnettuja jo vuosikymmenien ajan (Beightler ym. 1979, Hillier ja Lieberman 1980). Vaikka mahdollisia sovellutusalueita kartoitettiin (Clapham 1960, Lussier 1961, Donnelly 1963, Dane 1966, Bare ja Norman 1969) metsätaloudessa ja puunhankinnassa lähes rinnan muiden alojen sovellutusten kanssa, riittävän tietokone- ja laskentakapasiteetin puute rajoitti käytännön ongelmien ratkaisemista. Tämä pulma alkoi poistua vasta 1960-luvun loppupuolella uuden tietokoneteknologian esiinmarssin myötä.

Ensimmäisiä puunhankintaan soveltuvia malleja muotoiltiin USA:ssa (Donnelly 1963, Liitschwager ja Tcheng 1967, Tilghman 1967, Thompson 1968, Bare ja Norman 1969, Corcoran 1969, Thompson ja Haynes 1971) ja Ruotsissa (Lönnner 1968, Andersson 1971, Ljungman 1971).

Liitschwager ja Tcheng (1967) tarkastelevat Dantzingin ja Wolfen dekompositioalgoritmin soveltuvuutta hakkuiden ajoittamisongelman ratkaisussa. Tavoitefunktiossa maksimoidaan saatavana olevaa puumäärää. Tuloksena todetaan dekompositioperiaatteen olevan hyödyllisen ajoittamisongelmissa. Baren ja Normanin (1969) työssä tarkasteltiin kokonaislukuohjelmoinnin käyttömahdollisuuksia saman ongelman ratkaisussa.

Thompson ja Haynes (1971) sovelsivat kustannuksia minimoivan puunhankinnan lineaarimallin yrityksen suunnitteluperiodin puitteisiin ja kehittivät sitä stokastiseen suuntaan. Työssä määritettiin resurssien rajaehto-vektorien subjektiiviset todennäköisyydet ja käytettiin tätä tietoa kustannusfunktion odotusarvon laskemiseen. Menetelmä antoi yhdenmukaisia tuloksia deterministisen formuloinnin tulosten kanssa. Sen etuna todettiin suurempi varmuus sovellettaessa mallin an-

tamia tuloksia käytäntöön.

Lönnnerin (1968) kuljetusten optimoinnin lineaarimalli on rakennettu puunhankinnan yleisen suunnittelumallin yhteyteen. Siinä minimoidaan kuljetus- ja varastointikustannuksia hankinta-alueen puitteissa vuositasolla. Ajalliset, alueittaiset ja puutavaralajikohtaiset sekä kuljetusmenetelmärajoitukset rajoittavat toimintavaihtoehtoja. Kuljetusten alku- ja loppupisteet on tunnettava.

Anderssonin (1971) pitkän aikavälin suunnittelumallissa käytetään sekä tavallista lineaarista optimointia että kokonaislukuoptimointia binäärisillä päätösmuuttujilla. Ljungmanin (1971) mallissa käytetään myös binäärisiä kokonaisluku muuttujia eri leimikoiden puunkorjuun ajoituksen suunnittelussa. Kaikille yllä kuvatuille malleille on ominaista, että niiden avulla ei suoriteta varsinaista korjuu- tai kuljetusmenetelmävalintaa vaan ketjutetaan leimikoita annettujen resurssien puitteissa kokonaiskustannuksia minimoiden tai saatavaa puumäärää maksimoiden.

Tavoiteohjelmoinnin periaatteet esitettiin kohta lineaarisen optimoinnin keksimisen jälkeen (Charnes ym. 1955, Ijiri 1965, Lee 1972), mutta vasta Field (1973) toi tekniikan laajemmalti metsällisiin sovelluksiin. Sen jälkeen tavoiteohjelmointia on sovellettu useisiin ongelmiin ennen muuta metsätalouden järjestelyn, mutta myös puunhankintaorganisaatioiden toimintavaihtoehtojen tarkastelussa (Field 1973, Goal programming . . . Journal of Forestry 1977, Keipi 1978, Dyer ym. 1979, Kao ja Brodie 1979). Erinomaisen kuvauksen tavoiteohjelmoinnin metsällisten sovellutusten monista mahdollisuuksista on laatinut Field (1977).

Puunhankintaorganisaatioiden käyttöön tarkoitettun puun korjuun, kuljetuksen ja varastoinnin suunnittelumallin ja ratkaisuohjelmiston on kehittänyt Newnham (1975 a, 1975 b). Se perustuu lineaariseen ohjelmointiin, jolla kustannuksia minimoiden valitaan paras korjuu- ja kuljetusmenetelmä sekä varastointipolitiikka. Suunnittelumalli on saavuttanut

suuren suosion kanadalaisten puunhankintayritysten keskuudessa.

Dykstra on kehittänyt tuotantolaitosten sijoittamisteoriaan perustuvan puunkorjuumenetelmien suunnittelu- ja valintamallin sekä sen ratkaisualgoritmin (Dykstra 1976, Dykstra ja Riggs 1977). Runsaasti korjuumenetelmästä johtuvia kiinteitä kustannuksia eri vaiheissa sisältävä ongelma kuvataan binääriongelmana, 0,1-muuttujien avulla. Kooltaan pienet probleemat voidaan ratkaista 0,1-ohjelmoinnin keinoin, mutta laajoissa ongelmissa problema kasvaa nopeasti liian suureksi, jotta se olisi ratkaistavissa järkevän tietokoneajan puitteissa. Suurten ongelmien ratkaisua voidaan ratkaisevasti nopeuttaa Dykstran heuristisen algoritmin avulla. Nk. Cascade-algoritmi on osoittautunut tehokkaaksi kyseistä tyyppiä olevien ongelmien ratkaisussa. Dykstran metodia voitaneen soveltaa mitä moninaisimpiin suunnitteluongelmiin puunhankinnassa.

Ulkomaisen kirjallisuuden perusteella voidaan todeta, että tavoiteohjelmoinnin arvioidaan omaavan tätä nykyä hetkellä suurimman sovellutuspotentiaalin puunkorjuun ja -hankinnan alueella. Sen tulisi sisältää kuitenkin laajat jälkianalysyrutiinit.

3.2 Matemaattisen optimoinnin käyttösovellukset Suomen metsätaloudessa

Matemaattisten optimoinnin menetelmien käyttömahdollisuuksia metsätalouden ongelmien kuvaamisessa ja ratkaisemisessa on Suomessa ensimmäisenä tarkastellut Väisänen (1967 a). Erityisesti puun korjuu- ja kuljetusongelmiin soveltuvia menetelmiä pohiessaan hän painottaa toimintaa harjoittavan organisaatiotyypin ja tietojenkäsittelyjärjestelmän merkitystä. Ongelmakenttään soveltuvista menetelmistä mainitaan operaatioanalyysi, joka pitää sisällään mm. lineaarisen ja dynaamisen ohjelmoinnin, peliteorian, jonoteorian ja simuloinnin. Erikseen mainitaan verkkosuunnittelu, arvoanalyysi ja organisaatioteoria.

Varhaisimpia kotimaisia mallisovellutuksia ovat leimikkosuunnitelma (Väisänen 1967

b), tulotavoitteeseen perustuva hakkuulaskelma (Kilki 1968) ja metsikön optimihakkuuohjelma (Kilki ja Väisänen 1969). Kilkin hakkuulaskelmassa esitetään simuloinnin ja lineaarisen optimointimallin sovellutukset. Metsikön optimihakkuuohjelma on mallitettu dynaamisen ohjelmoinnin avulla. Koska tietojenkäsittely-ympäristö ei vielä tuolloin ollut valmis menetelmien laajemmalle käytölle kentällä, mallit jäivät lähinnä tutkijoiden käyttöön esimerkkinä siitä, että operaatiotutkimuksen menetelmiä voidaan soveltaa käytännön ongelmiin.

Puunhankintayritysten käyttöön kehitettiin lineaarimalleja kuljetusten optimointia varten 1970-luvun alkupuoliskolla. Julkaistua dokumenttia näistä ei kuitenkaan ole, vain viittauksina eräissä myöhemmissä julkaisuissa (Eskelinen ja Peltonen 1977). Saman vuosikymmenen alkupuolella simuloinnin mahdollisuuksia selvitettiin paljon (Seppälä 1971, Peltonen 1973, Peltonen ja Vesikallio 1974). Lineaarimallien käyttösovellutukset lisääntyivät vuosikymmenen puolen välin jälkeen selvästi paitsi metsänarvioimisen, myös puunkorjuun sovellutusten ja metsätalouden liiketieteen alalla (Mikkonen ym. 1975, Kilki ym. 1977, Eskelinen ja Peltonen 1977, Keipi 1977, Eskelinen ym. 1978, Laakkonen 1978, Keipi 1978, Mikkonen 1978 a, 1978 b, Laakkonen 1979, Mikkonen 1980).

Operaatiotutkimuksen menetelmien tähänastisia sovellutuksia puunhankintaan mahdollisuuden piirissä ovat selvittäneet Eskelinen ja Keskinen (1981).

Yleisenä huomiona mallisovellutusten syntymisestä on todettava, että ne ovat vaatineet hyvien tietojenkäsittelymahdollisuuksien olemassaolon. Tulevaisuutta tarkasteltaessa ja uusien operaatiotutkimuksen menetelmien käyttöön tuloa arvioidessa on huomattava, että tietojenkäsittelyn hajautus on etenemässä käytännön ongelmien parissa työskentelevien tasolle (Eskelinen ja Peltonen 1980, Peltonen 1981). Näin ollen edellytykset käytännön suunnitteluongelmien tuomisesta tietokoneille käyttäjäläheisesti ovat olennaisesti parantuneet. Mallien ja ratkaisualgortimien kehittälyä näihin puitteisiin tuleekin jatkaa entistä tiiviimmin, mistä on merkkejä näkyvissä.

4 HYVÄN SUUNNITTELUALGORITMIN VAATIMUKSET

Hyvän suunnittelualgoritmin perimmäisenä tarkoituksena on tuottaa paras ratkaisu käsillä olevaan ongelmaan. Optimaalisen päätöksenteon taustalla optimointiteorian mukaan on kolmivaiheinen prosessi, joka sisältää seuraavat osat (Beightler ym. 1979).

1. Tutkittava systeemi tai järjestelmä on tunnettava yksityiskohtaisesti ja systeemimuuttujat ja niiden vaikutussuhteet on pystyttävä mittaamaan ja ilmaisemaan kvantitatiivisessa muodossa.
2. On oltava joku tehokkuusmittari tai -mittareita, jotka voidaan ilmaista systeemimuuttujien avulla.
3. Systeemimuuttujille on valittava jonkin algoritmin avulla sellaiset arvot, jotka antavat tehokkuusmittarille optimaalisen arvon.

Puunkorjuun ja -kuljetuksen sekä -tehdaskäsittelyn menetelmien suunnittelussa ja päätöksenteossa käytettäville optimointimalleille ja niiden ratkaisualgoritmeille voidaan asettaa vaatimuksia kahdella eri tasolla: toisaalta algoritmien on oltava teoreettisesti päteviä ja niiden käyttö ko. ongelman ratkaisemiseen sitä kautta perusteltua, toisaalta niiden ominaisuudet on arvioitava käytännön lähtökohdista sen organisaation puitteissa, joka optimointia suorittaa.

Teoreettiselta kannalta puunhankinnan ongelmiin sovellettavien mallien ja algoritmien on

- sisällettävä kvantitatiivisia muuttujia
- tuotettava käyviä ja kokonaisuutta optimoivia ratkaisuja
- kyettävä käsittelemään useita päätösmuuttujia samanaikaisesti
- otettava huomioon mahdollisesti keskenään ristiriidassa olevat tavoitteet
- pystyttävä tarvittaessa käsittelemään kokonaislukumuuttujia
- on sisällettävä laajat tulosten jälkikäsittely- ja herkkyysanalyytit
- annettava tuloksena taloudellista tietoa vaihtoehtoisista ratkaisuista
- pystyttävä käsittelemään eri suureilla mitattavia tekijöitä.

Käytännön sovellettavuuden kannalta niiden

- on oltava helposti muotoiltavissa ko. ongelmiin
- on oltava konkreettisesti ongelmakenttään soveltuvia
- sisällettävä aikatekijän käyttömahdollisuus
- on oltava helppoja ja nopeita käyttää asianomaisessa atk-ympäristössä
- on oltava halpoja käyttää

5 PUUN KORJUU-, KULJETUS- JA KÄSITTELYONGELMAN YLEINEN KUVAUS

5.1 Yleistä

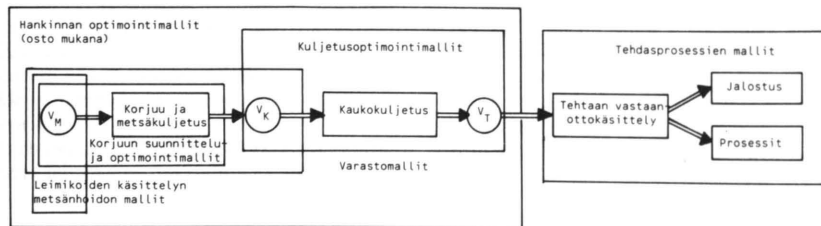
Puun korjuuta, metsäkuljetusta, kuormausta metsävarastolla ja kaukokuljetusta sekä puuraaka-aineen tehtaalla tapahtuvaa vastaanottokäsittelyä voidaan kuvata yleisellä lineaarisella tai lineaarisiksi palautuvalla virtausmallilla. Siinä raaka-aine kulkee vaihtoehtoisten käsittely- ja kuljetusvaiheiden kautta varsinaiseen jalostusprosessiin. Malliin liittyy yleensä joku tehokkuusmittari tai tavoitefunktio, joka tässä tapauksessa käsitellään lähinnä kustannusfunktioksi. Tätä funktiota optimoidaan.

Metsävaiheessa tapahtuvat työt, esimerkiksi katkonta ja karsinta, käsitellään loppu-tuotteen määräämiksi puuraaka-aineen (mekaanisen) jalostuksen esi- tai osavaiheiksi. Monet tätä nykyä metsässä suoritettavat toimenpiteet tulevat silloin ymmärrettäviksi ja operationaaliksi. Tätä kautta voidaan analysoida eri työvaiheita, kuten karsintaa, katkontaa tai kuorintaa, ja hakea niille vaihtoehtoisia suorituspaikkoja ja menetelmiä. Näin järjkeistetään koko tuotantoketjua kokonaisuuden kannalta parhaimmalla tavalla (vrt. Elovainio ja Väisänen 1972, Eskelinen ym. 1976, Rumpunen 1980). Äärimmillen pelkistettynä perinteistä hakkuutyötä on vain puun irrrottaminen kasvualustastaan eli kaato, jota ei voida tehdä missään muualla kuin puun kasvupaikalla metsässä. Kuljetus ei luonteel-

taan ole jalostusta vaan jalostuksen eri vaiheiden välinen palvelutoiminto. Mikä tahansa muu työvaihe on periaatteessa suoritettavissa missä tahansa tuotantoketjun muista vaiheista. Luonteeltaan työvaiheet ovat palautumattomia, ts. kun työvaihe on suoritettu, esim. katkonta, sen seuraukset – myös mahdolliset virheet – tuntuvat koko tuotantoketjun loppuosalla. Eräiden työvaiheiden kohdalla jo suoritettujen toimenpiteiden, ts. ”jalostusasteen”, ylläpidosta ketjun myöhemmissä vaiheissa voi aiheutua hankaluuksia ja ylimääräisiä kustannuksia. Tällainen työvaihe on mm. lajittelu.

Kuvassa 1 on pelkistettynä kaaviona esitetty peräkkäisrakenteinen puun korjuun, kuljetuksen ja tehdaskäsittelyn ketju. Mallisovellutukset, joita on tähän saakka Suomessa käytetty, on esitetty eri vaiheita yhdistävinä laatikkoina (vrt. Eskelinen ja Peltonen 1977).

Puuraaka-aineen lähteet (V_M) voidaan luokitella leimikkotekijöiden, sijainnin ja kuljetusetäisyyden, puuston jne. perusteella sillä tavalla, kun kulloinkin tutkimusongelma vaatii. Useimmiten on tähänastisissa tutkimuksissa tyydytty leimikkotason luokitukseen esimerkiksi yleisissä kuljetusmallisovellutuksissa (vrt. Lönner 1968, Eskelinen ja Peltonen 1977). Leimikko voidaan kuvata myös sen sisäisten puustotunnusten mukaisesti (Mikkonen 1978 a, 1980) esimerkiksi menetelmien kehittämistutkimuksissa.



Kuva 1. Puunhankinnan ketjurakenne sekä sen kuvaamisessa ja analysoinnissa käytetyt malliryhmittelyt.

Korjuumenetelmät voivat olla mitä tahansa korjuumenetelmiä tai niiden yhdistelmiä sisältäen hakkuun ja metsäkuljetuksen työvaiheet. Ainut edellytys korjuumenetelmän kelpoisuudelle on, että sen käyttämisen tekniset tuotos- ja kustannusvaikutukset on tunnettu tai että ne pystytään laskemaan.

Korjuuketjut ovat harvoin niin kuumia, että metsäkuljetuksen jälkeistä kaukokuljetusvarastointia ei tarvittaisi. Varastoilla (V_{K1}) tehtäviin töihin voidaan sisällyttää purkamisen ja kuormauksen lisäksi esimerkiksi lajittelu- tm. työvaihe. Kaukokuljetusvarastosta puuraaka-aine siirretään eri kuljetustapojen avulla tehdasvarastoihin (V_{Tp}). Kuljetus- ja puunhankintamalleissa (vrt. Lönner 1968, Eskelinen ja Peltonen 1977, Keipi 1978) kuljetustapoja ovat yleensä olleet traktorikuljetus (harvoin), autokuljetus, rautatiekuljetus ja vesitiekuljetus, josta tarkastelun kohteena yleensä on ollut ainoastaan puutavaranto. Tarkasteluja kuljetustapojen sisällä eri kuljetusmenetelmien vertailemiseksi ei yleensä kokonaisuuden puitteissa ole tehty. Kuljetusmenetelmiä on vertailtu ja kehitetty erillisissä tutkimuksissa ja kokeissa.

5.2 Tutkimusongelman mallittaminen

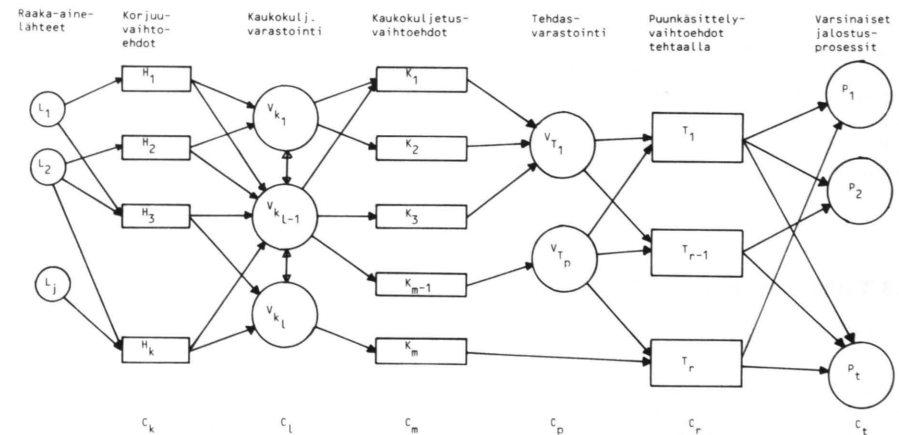
Tätä tutkimusta varten puunhankinta kuvataan kaaviokuvan 2 mukaisella tavalla. Siinä malliin sisällytetään paitsi metsälliset kor-

juu- ja kuljetustoiminnot, myös varsinaista jalostusta edeltävät puunkäsittelyn vaihtoehdot. Tällaisella mallin muotoilulla päästään tarkastelemaan vaikkapa puuraaka-aineesta saatavan energian merkitystä keskitetysti, eri työvaiheiden suorituspaikan vaikutusta, konekapasiteetin hyväksikäyttöä tm. operationaalista muuttujaa.

Mallin muuttujajoukon (x -vektori) muodostavat puuraaka-ainemäärät, joita eri vaiheissa eri menetelmillä käsitellään, kuljetaan tai varastoidaan. Ne mitataan tarkoitukseenmukaisimmalla mittayksiköllä, joka on kuorellinen kiintokuutiometri. Kertoimien avulla päästään tarvittaessa mihin tahansa muuhun mittayksikköön.

Mallin ongelma-avaruutta voidaan rajoittaa eri vaiheissa seuraaventyyppisillä rajaehdoilla tai vaatimuksilla:

1. Olosuhde- ja/tai ajalliset rajoitukset
2. Raaka-aineen määrälliset rajat
3. Raaka-aineen laadulliset rajat
4. Resurssirajoitukset tai vaatimukset
 - työtunnit
 - konetunnit
 - tuottavuus
5. Taloudelliset rajoitukset
 - investointivarat
 - käyttökustannukset
 - laatutappiot
 - kuljetustappiot tai hävikki
6. Ulkoiset tai ympäristön rajoitukset
 - lakien ja asetusten asettamat rajoitukset



Kuva 2. Puunhankinnan lineaarimallin peräkkäisrakenteen kaaviokuvana.

- maisemalliset rajoitukset
 - moninaiskäytön rajoitukset
7. Tuotannolliset tavoitteet

Ympäristönsuojelun ja maiseman taloudellisten arvojen tai moninaiskäyttöarvon määrittäminen ja huomioon ottaminen talousmetsien korjuumenetelmävalinnoissa on toistaiseksi kvantitatiivisessa muodossa äärimmäisen vaikeaa. Sitä varten olisi näille arvoille pystyttävä määrittämään kussakin tapauksessa varjohinnat ja transformaatiokäyrät (esim. Saastamoinen 1982). Operatiivisesti voidaan eräitä tällaisia rajoituksia, esimerkiksi tienvarsi- tai ranta-alueiden hakkuurajoitukset, ottaa mallittamisessa huomioon.

Matriisialgebran avulla esitettyä ongelmaa on seuraava:

$$\text{Optimoi } Z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

$$\text{kun } \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{b} \\ \mathbf{x} \geq 0$$

Vektori \mathbf{c}^T muodostuu eri vaiheiden menettimien kustannusvektoreista

$$\mathbf{c}^T = [\mathbf{C}_k, \mathbf{C}_l, \mathbf{C}_m, \mathbf{C}_p, \mathbf{C}_r, \mathbf{C}_t, \mathbf{C}_i] \quad (2)$$

Rajoitusehtojen teknisten kerrointen matriisi \mathbf{A} , joka hajoitettuna osamatriiseihin on

$$\mathbf{A} = [\mathbf{L}_p, \mathbf{H}_k, \mathbf{V}_l, \mathbf{K}_m, \mathbf{V}_r, \mathbf{T}_t, \mathbf{P}_i | \mathbf{I}] \quad (3)$$

Matriisi \mathbf{A} sisältää myös simplex-algoritmin tarvitseman yksikkömatriisin \mathbf{I} apumuuttujineen. Osamatriisit \mathbf{V}_l ja \mathbf{V}_p ovat tyyppiä 1) ja 3) osamatriisit \mathbf{H}_k , \mathbf{K}_m , \mathbf{T}_t ja \mathbf{P}_i tyyppiä 4), 5) ja 6). Tuotannolliset tavoitteet prosesseissa \mathbf{P}_i tai varastotavoitteet \mathbf{V}_l ja \mathbf{V}_p muodostavat mallin toiminnan liikkeelle paisevan voiman, sen "imun".

Rajaehtoien \mathbf{b} -vektori sisältää raaka-aineen, resurssien ja tuotantomäärien määrälliset ylä- tai/ja alarajat tai tuotantotavoitteet.

5.3 Tarkasteltavat menetelmät

5.3.1 Lineaarimallien alkuoletukset

Lineaarimallien käyttö matemaattisissa ohjelmoinnissa perustuu neljän keskeisen oletuksen varaan, jotka ovat suhteellisuus, yhteenlaskettavuus, jaettavuus ja varmuus. Ne sisältyvät implisiittisesti mallin muotoiluun

(Hillier ja Lieberman 1980). Koska tässä tutkimuksessa tarkasteltavat menetelmät ovat perusluonteeltaan lineaarimalleja, kutakin olettamusta käsitellään erikseen. Tutkimuksen kunkin menetelmän tarkemman kuvauksen kohdalla esitetään, mistä ja miten perusolettamuksista joudutaan poikkeamaan ja miten tämä vaikuttaa menetelmien sovellettavuuteen ja tulosten tulkintaan.

Suhteellisuus ilmenee siten, että kukin aktiviteetti k (päätosmuuttuja x_k) itsenäisesti riippumatta muista aktiviteeteista, saadessaan nolasta poikkeavia arvoja, kuluttaa sille varattuja resursseja ja aiheuttaa kustannuksia (tai tuottaa tuloa) suorassa suhteessa aktiviteetin tasoon nähden resurssimatriisin alkiona $a_{ik}x_k$ ja tavoitefunktion kustannuseränä c_kx_k . Tämä näkyy erityisesti siten, että ei ole mitään kiinteää kustannusta tai resurssikulutusta, kun aktiviteetti on nollassa. Tämä lineaarinen suhteellisuus pätee muuttujan koko tarkasteluvälillä.

Yhteenlaskettavuus merkitsee sitä, että eri aktiviteettien välillä ei ole yhdysvaikutuksia. Siten millä tahansa toiminnan tasolla resurssikulutuksen summa ja tavoitefunktion arvo ovat yhtenevät eri aktiviteettien toisistaan riippumatta aiheuttaman resursien kulutuksen tai tavoitefunktion osa-arvojen yhteenlasketun määrän kanssa. Suhteellisuus- ja yhteenlaskettavuusvaatimus yhdessä muodostavat välttämättömän ja riittävän ehdon takaamaan mallin lineaarisuuden.

Jaettavuus tarkoittaa sitä, että eri aktiviteettien päätösmuuttujat x_k voivat saada desimaaliarvoja. Monesti päätösmuuttujilla on merkitystä vain, jos niillä on kokonaislukuarvoja. Tätä asiaa tarkastellaan lähemmin kokonais- ja sekalukuohjelmoinnin yhteydessä.

Varmuus tarkoittaa sitä, että mallin parametrien arvot kustannusvektorissa \mathbf{c}^T , kerroinmatriisissa \mathbf{A} ja rajaehtovektorissa \mathbf{b} oletetaan tunnetuiksi vakioiksi. Mallit ovat luonteeltaan ja toteutukseltaan deterministisiä. Tähän liittyvät lineaarimallien käytännön sovellettavuuden suurimmat ongelmat. Tarkemmin asiaa käsitellään parametrin ohjelmoinnin ja tavoiteohjelmoinnin yhteydessä.

5.3.2 Standardi lineaarinen optimointi

Mikä tahansa lineaarisen ohjelmoinnin ongelma voidaan muuttaa kaavan (1) esittämään muotoon ja ratkaista käyttäen simplex-algoritmia tai sen kehittyneimpiä versioita.

Matriisi $\mathbf{A}\mathbf{x}$ kuvataan kantamuuttujien ja ei-kantamuuttujien avulla seuraavasti.

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{N}\mathbf{x}_N + \mathbf{B}\mathbf{x}_B = \mathbf{b} \quad (4)$$

jossa \mathbf{x}_N = ei-kannassa olevien muuttujien vektori
 \mathbf{x}_B = kantamuuttujien vektori
 \mathbf{N} = ei-kantamuuttujien kerroinmatriisi
 \mathbf{B} = kantamuuttujien kerroinmatriisi

Matemaattisesti optimaalinen ratkaisu saadaan (Simmons 1972, Zionts 1974), kun

$$\mathbf{x}_B^* = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}; Z^* = \mathbf{c}_B\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} \quad (5)$$

missä matriisi \mathbf{B}^{-1} on optimaalisen kannan käänteismatriisi ja vektori \mathbf{c}_B optimaalisen kannan kustannusvektori. \mathbf{x}_B^* muodostaa optimaalisessa kannassa olevien muuttujien joukon ja Z^* on tavoitefunktion optimaalinen arvo.

Ongelman ratkaisua voidaan havainnollistaa graafisesti, jos kuvitellaan, että muuttujajoukko

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \end{bmatrix}$$

kuvataan 2-ulotteisena. Kuvassa 3 hypertasojen R_1, R_2, R_3 ja R_4 rajoittama hypertahokas A muodostaa käyvän ongelma-avaruuden. Hypertaso L_s muodostaa maksimointiongelman tavoitefunktion ja hypertaso L_p minimointiongelman tavoitefunktion. Maksimointiongelmasa suurimman arvon hypertaso L_s saavuttaa kärkipisteessä C ja tavoitefunktio L_s^* muuttujien arvoilla $\mathbf{x}_B^* = \mathbf{x}_B^*$ ja $\mathbf{x}_A^* = \mathbf{x}_A^*$. Vastaavan minimointiongelman pienin arvo saavutetaan kärkipisteessä A ja hypertaso $L_p = L_p^*$ muuttujien arvoilla $\mathbf{x}_A^* = \mathbf{x}_A^*$ ja $\mathbf{x}_B^* = \mathbf{x}_B^*$. Hypertasoja L_s^* ja L_p^* ei voida siirtää kauemmas poistumatta käyvästä ongelma-avaruudesta A .

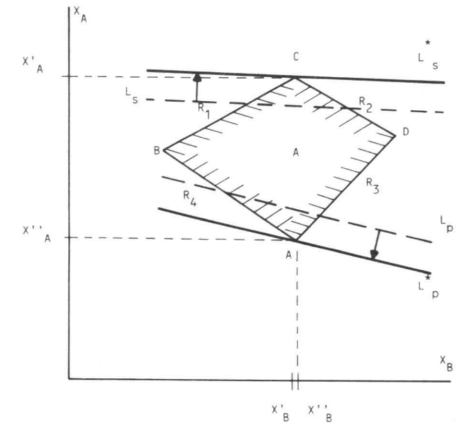
Teoreettiselta kannalta standardin lineaarisen ohjelman ominaispiirteitä ovat:

- Muuttujien oltava lineaarisia tai sellaiseksi palautuvia sekä ongelma-avaruuden konvekksi hypertahokas
- Muuttujien saamat arvot ovat aina positiivisia reaalilukuja eli $x \geq 0$, $X \in R$, mutta myös etumerkiltään rajoittamattomat muuttujien arvot ovat mahdollisia transformaation

$$x_j = x_j - x^{11}; x_j \geq 0; x^{11} \geq 0 \quad (6)$$

avulla. Simplex-menetelmä tuottaa kuitenkin uusille päätösmuuttujille x_j ja x^{11} ei-negatiiviset arvot, joiden avulla lasketaan alkuperäisen päätösmuuttujan arvo (Hillier ja Lieberman 1980, s. 58–59).

- On olemassa vain yksi tavoitefunktio, ilmaistuna yhden suureen yksiköiden avulla
- Tavoitefunktio saa vain yhden arvon, joka on matemaattisesti optimaalinen (joko pienin tai suurin)
- Lineaarinen optimointi tuottaa kokonaisoptimin
- Herkkyyksianalyysien avulla voidaan laskea kannassa olevan muuttujajoukon \mathbf{x}_B kustannusvektorille \mathbf{c}_B , raja-vektorille \mathbf{b}_B ja matriisille \mathbf{A} kertoimelle raja-arvo, joiden välillä saatu ratkaisu pysyy optimaalisena
- Ongelmalla saattaa olla vaihtoehtoisia ratkaisuja. Se on kuitenkin perin harvinaista. Toisin sanoen sama tavoitefunktion arvo saavutetaan erilaisilla päätös-
muuttujien arvoyhdistelmillä



Kuva 3. Lineaarisen optimoinnin standardiongelman graafinen tulkinta.

- Standardiprobleeman primaaliseen ratkaisuun liittyy aina duaaliongelman ratkaisu, jonka tulkinnalla on taloudellisessa mielessä tärkeä merkitys
- Standardiongelman muotoilu ja ratkaisu eivät riko mitään esitettyistä alkuoletuksista.

5.3.3 Parametrinen optimointi

Parametrinen ohjelmointi on lineaarisesta ohjelmoinnista kehitetty tekniikka, jossa aktiviteettien eli muuttujavektorin \mathbf{x} arvot tai tavoitefunktion Z arvo ilmaistaan parametrisoimalla osittain tai kokonaan tavoitefunktion kustannuskerroinvektori \mathbf{c}^T , rajahtovektori \mathbf{b} tai probleemamatriisi \mathbf{A} . Myös yhdistetty \mathbf{c}^T - ja \mathbf{b} -vektoreitten parametrisointi on mahdollinen kuten myös muut kombinaatiot. Varsinkin \mathbf{A} -matriisin parametrisointi on laskennallisesti työläs.

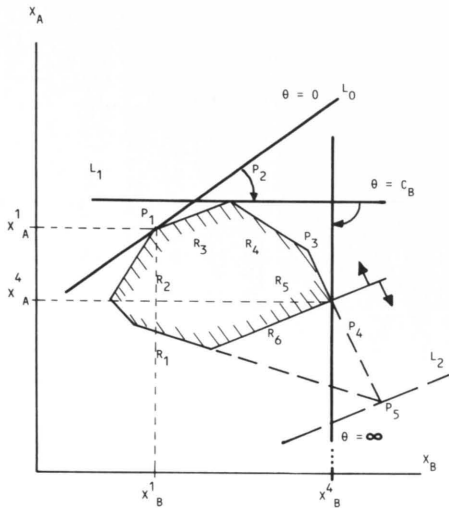
Ylivoimaisesti yleisin tapa on parametrisoida alkiokerrallaan tavoitefunktion Z kustannuskerroinvektori \mathbf{c}^T tai rajahtovektori \mathbf{b} . Tällöin optimointiongelma muodostuu (Simmons 1972, Taha 1972)

$$\text{Optimoi } Z = (\mathbf{c} + \theta\mathbf{s})^T \mathbf{x} \quad (7)$$

$$\text{kun } \mathbf{A}\mathbf{x} = (\mathbf{b} + \theta)\mathbf{t} \\ \mathbf{x} \geq 0 \\ \theta, \theta \geq 0, \text{ skalaariparametreja}$$

Graafisesti parametrisointia voidaan havainnollistaa kuvassa 4 esitetyllä tavalla.

Oletetaan, että maksimointiongelma voidaan esittää kaksikulotteisena, Hypertasot $R_1 - R_6$ rajoittavat ongel-



Kuva 4. Parametrisen optimoinnin graafinen tulkinta.

ma-avaruuden, joka on konvekksi hypertahokas A . Tavoitefunktio on hypertaso L_0 , jonka muuttujan \mathbf{x}_B kustannuskertoimen c_B on parametrisoitu. Alkuperäisen ongelman ($\theta = 0$) optimaalinen ratkaisu toteutuu kärkipisteessä P_1 muuttujien arvoilla $\mathbf{x}_A^* = \mathbf{x}_A^1$, $\mathbf{x}_B^* = \mathbf{x}_B^1$. Tällöin tavoitefunktio on

$$\text{Max } Z = \mathbf{c}_A \mathbf{x}_A + (\theta - c_B) \mathbf{x}_B \quad (8)$$

Kun parametrin θ -arvo kasvaa nolasta positiiviseen suuntaan kohti ääretöntä, muuttuvat optimaalisen ratkaisun kärkipisteet vastaavasti P_1 :stä P_4 :ään. Samalla tavoitefunktion Z^* arvo kasvaa lineaarisesti θ :n funktiona θ :n kriittisten arvojen $\theta^1, \theta^2, \theta^3$ ja θ^4 välillä. θ :n arvolla $\theta = c_B$ tavoitefunktio L_1 on akselin x_B suuntainen. Optimaalinen kantaratkaisu muuttuu operaation aikana $\mathbf{x}_A^* = \mathbf{x}_A^1 \rightarrow \mathbf{x}_A^2 \rightarrow \mathbf{x}_A^3 \rightarrow \mathbf{x}_A^4 \rightarrow \mathbf{x}_A^5$. Tässä tapauksessa tavoitefunktio kasvaa θ :n kasvaessa. Kriittisillä θ :n arvoilla tavoitefunktio on rajaehtoylehtälöiden R_3, R_4 ja R_5 suuntainen. Välillä $\theta^4 \geq \theta \geq \infty$ kantaratkaisu ei enää muutu. Käytännössä tämä tekniikka merkitsee sitä, että tavoitefunktiota (hypertaso L_0) "pyöritetään" käyvän ongelma-avaruuden ympäri valitun muuttujan suhteen halutussa suunnassa ja katsotaan, miten kantaratkaisu ja tavoitefunktio muuttuvat.

Rajahtovektorin \mathbf{b} parametrisointi merkitsee graafisesti sitä, että esimerkiksi rajahtohypertasoa R_6 siirretään jompaankumpaan suuntaan sen kulmakertoimen pysyessä muuttumattomana \emptyset :n osoittama määrä ja tutkitaan, mikä vaikutus tällä on optimaaliseen ratkai-

suun. Optimaalinen ratkaisu siirtyy esimerkiksi pisteestä P_4 pisteeseen P_3 . Matriisin \mathbf{A} parametrisointi tarkoittaa graafisesti tulkittuna rajahtoina olevien hypertasojen $R_1 - R_6$ kulmakertoimen muutoksen vaikutusten tutkimista.

Ratkaisutekniikka ei teoreettisesti aseta rajoja θ :n tai \emptyset :n arvolle vaan ne voivat vaihdella $-\infty < \theta, \emptyset < \infty$. Myöskään se, onko kysymyksessä minimointi- vai maksimointiongelma, ei ole este, sillä ongelmatyypit ovat täydellisesti toisikseen muunneltavissa.

Teoreettiselta kannalta tarkasteltuna parametrisen ohjelmoinnin ominaispiirteitä ovat:

- Kaikki standardin lineaarisen optimoinnin ominaispiirteet sisältyvät myös parametrisen ohjelmointiin
- Sen avulla voidaan lieventää lineaarimallien deterministisyyden aiheuttamia hankaluuksia
- Se mahdollistaa epävarmuuden huomioon ottamisen tulosten tulkinnassa ja on sen vuoksi huomattavasti käyttäjäystävällisempi ja laaja-alaisempi
- Parametrisiä muutoksia voidaan tarkastella joko epä-jatkuvina tai jatkuvina
- Parametrisen optimoinnin ratkaisutekniikkana voidaan käyttää dualista simplex-algoritmia, mikä helpottaa laskutoimituksia ja mahdollistaa yhtäaikaistet kustannus- ja resurssivektorien tarkastelut
- Parametrisesta optimoinnista saatava taloudellinen informaatio on yhtä tärkeä ja tulkittavissa samalla tavalla kuin standardin lineaarisen ohjelmoinnin taloudellisen informaation
- Laajojen mallien ja useiden muuttujien parametrisen yhtäaikaisten tarkastelujen josta nykyisiä tietokoneita käyttäen työläs ja runsaasti laskenta-aikaa kuluttava ja siksi kallis toimenpide

5.3.4 Tavoiteoptimointi

Matemaattisen ja erityisesti lineaarisen ohjelmoinnin ominaispiirre on, että tehokkuutta mitataan vain yhden suuren suhteen. Pyritään maksimoimaan tuottoja, minimoimaan kustannuksia tai optimoimaan jotain muuta.

Käytännön ongelmien ratkaisussa joudutaan lähes poikkeuksetta tilanteeseen, jossa on kyettävä ottamaan huomioon useita tavoitteita samanaikaisesti. Tavoitteet saattavat olla usein ristiriidassa keskenään. Esimerkkinä puunkorjuusta vaikkapa harvennushakkuiden mahdollisimman suuri harvennuskertymä, alhaisten korjuukustannusten tavoittelu, työllistäminen tai ajourien mahdollisimman alhainen määrä pinta-alayksikköä kohti.

Muotoilemalla lineaarisen optimoinnin ongelma tavoiteoptimoinnin keinoin samanaikainen useisiin tavoitteisiin pyrkiminen voidaan ottaa huomioon. Eri tavoitteiden ei tarvitse olla yhteismittallisia suureita. Tällöin on kuitenkin tiedettävä strategia, miten eri tavoitteisiin tu-

lee pyrkiä, tai on tunnettava eri tavoitteiden tärkeysjärjestys suhteasteikolla mitattuna.

Jos tavoitteiden saavuttamiseen käytettävä strategia tiedetään, tavoiteoptimoinnin keinoin muotoiltuna ongelmana on

$$\text{Optimoi } Z_{st} = \mathbf{z} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Kun } \mathbf{T}\mathbf{x} - \mathbf{z} &= \mathbf{t} \\ \mathbf{A}\mathbf{x} &= \mathbf{b} \\ \mathbf{x} &\geq 0, \mathbf{z} \geq 0 \end{aligned}$$

Tavoitevektorista \mathbf{t} poikkeamista kuvaavaa vektoria \mathbf{z} optimoidaan valitun strategian Z_{st} puitteissa. Matriisi \mathbf{T} on tavoitefunktioiden kerrointen matriisi, muut määritellyt kuten aiemmin on esitetty. Strategiana voi esimerkiksi olla suurimman poikkeaman minimointi asetetuista tavoitteista.

Jos tavoitteiden hierarkia tunnetaan suhteasteikolla, vain tavoitefunktio muotoillaan uudelleen.

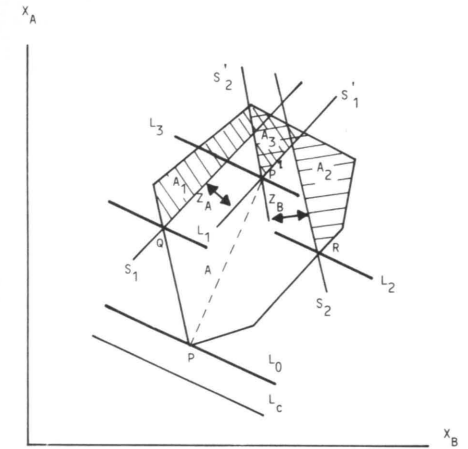
$$\text{Optimoi } Z = \mathbf{w}^T \mathbf{z} \quad (10)$$

jossa \mathbf{w}^T on tavoitteiden painokertoimet sisältävä vektori. Tavoiteoptimoinnin ongelmaa voidaan havainnollistaa graafisesti kuvassa 5 esitetyllä tavalla.

Hypertahokas A rajoittaa käyvän 2-ulotteisen ongelma-avaruuden. Tavoitteena on minimoida poikkeamafunktion L_C -arvo. Tapauksessa, jolloin mitkään tavoitteet eivät ole keskenään ristiriidassa, optimi toteutuu pisteessä P . Kun ongelmaan lisätään ensimmäistä tavoitetta kuvaava hypertaso S_1 , joka on esimerkiksi puunkorjuun vaatimus, käypä ongelma-avaruus rajoittuu hypertahokkaaksi A_1 ja saatu optimaalinen ratkaisu toteutuu pisteessä Q . Jos toisaalta ongelmaan lisätään kustannuksia kuvaava hypertaso S_2 , optimaalinen ratkaisu toteutuu pisteessä R . Havaitaan, että molemmat tavoitteet eivät voi toteutua samanaikaisesti, sillä ongelma on ei-käypä.

Tavoiteoptimoinnin avulla tästä ongelma-avaruudesta päästään siten, että määritetään rajahtojen S_1 ja S_2 suurin sallittu poikkeama, joka tekee ongelma-avaruuden käyvän. Tässä esimerkissä tämä toteutuu pisteessä P^1 , joka antaa optimaalisen ratkaisun tavoitefunktion ollessa L_3 .

- Tavoiteoptimoinnin teoreettisia ominaispiirteitä ovat:
- Voidaan tarkastella useita keskenään ristiriitaisia tavoitteita samanaikaisesti
 - Jos tavoitteiden hierarkia ja tärkeysjärjestys tai optimihakustrategia tunnetaan, päästään kokonaisuoptimointiin
 - Tarkasteltavat suureet voivat olla keskenään yhteismittattomia, mutta ne ilmaistaan yhden tavoitefunktion puitteissa
 - Ratkaisutekniikat perustuvat simplex-algoritmiiin
 - Optimiratkaisun taloudellinen tulkinta ei ole mielekäs



Kuva 5. Tavoiteoptimoinnin ongelman havainnollistaminen graafisesti.

sellaisissa tapauksissa, joissa tarkastellaan yhteismittattomia suureita

- Tavoitteiden vuorovaikutussuhteiden oletetaan olevan lineaarisia
- Kysymys on ratkaisun tyydyttävän tason saavuttamisesta yhden tekijän optimoinnin sijasta
- Laajat herkkyysanalyysit ja parametrisen tarkastelu ovat mahdollisia myös tavoiteohjelmointia käytettäessä
- Kaikki lineaarimallien alkuoletukset pätevät tavoiteoptimoinnin tapauksessa. Deterministisyyttä voidaan tutkia parametrisoinnilla
- Tavoiteohjelmointi ei anna ratkaisua eri tavoitteiden keskinäiselle arvojärjestykselle

5.3.5 Kokonais- ja sekalukuoptimointi

Käytännön ongelmia mallitettaessa joudutaan usein tilanteeseen, jossa päätösmuuttuja voi saada vain kokonaislukuarvoja. Puunkorjuussa on esimerkiksi päätettävä, hankitaanko yksi, kaksi vai kolme monitoimikonetta, perustetaanko nippujen pudotuspaikkoja ja kuinka monta, investoidaanko runkojen tai kokopuiden käsittelyeseen jne. Kysymykseen tuleva ohjelmointitekniikka, jolla ongelma voidaan mallittaa ja ratkaista, on esimerkiksi kokonaisluku- tai sekalukuohjelmointi. Kun päätösmuuttujat ovat luonteeltaan binäärisiä, ts. voivat saada arvon 0 tai 1, kysymyksessä on kokonaislukuohjelmoinnin erikoistapaus, nolla-yksiohjelmointi. Sekalukuohjel-

massa vain osa muuttujista saa kokonaislukuarvoja ja loput saavat jatkuvia arvoja.

Lineaarinen sekalukuongelma voidaan muotoilla seuraavasti (vrt. Salkin 1975).

$$\text{Optimoi } Z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} + \mathbf{d}^T \mathbf{y} \quad (11)$$

$$\text{kun } \mathbf{Ax} + \mathbf{Dy} = \mathbf{b}$$

$$\mathbf{x} \geq 0; \mathbf{y} \geq 0$$

y kokonaisluku

jossa \mathbf{y} on kokonaislukumuuttujavektori ja \mathbf{d}^T tavoitefunktion kokonaislukumuuttujien kerroinvektori, \mathbf{D} kokonaislukujen probleemamatriisi ja muut kuten aikaisemmin on esitetty. Jos $\mathbf{y} = 0$, on kyseessä tavallinen lineaarinen optimointiongelma, ja jos taas $\mathbf{x} = 0$, on kyseessä puhtas kokonaislukuongelma. Muuttujat vektorissa \mathbf{y} voivat saada myös arvoja 0 tai 1. Mikä tahansa kokonaislukuoptimoinnin ongelma voidaan muuntaa nolla-yksiongelmaksi ja ratkaista (McMillan 1975, Salkin 1975, Dykstra 1976, Williams 1979). Tämä tapahtuu seuraavasti:

Kokonaislukumuuttuja y_i vektorissa \mathbf{y} korvataan joukolla binäärimuuttujia z_{ji}

$$y_i = (z_{0i}, z_{1i}, z_{2i}, \dots) = \sum_{j=0}^k 2^j z_{ji} \quad (12)$$

jossa k on pienin kokonaisluku, joka täyttää ehdon

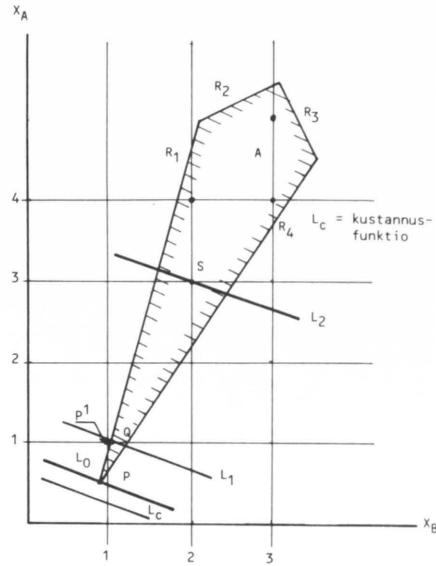
$$k \geq \frac{\ln(U_i + 1)}{\ln 2} - 1 \quad (13)$$

ja U_i on yläraja-arvo muuttujalle y_i .

Ongelman kaikki muuttujat y_i korvataan uusilla muuttujilla z_{ji} ja ratkaistaan uusi muunnettu ongelma.

Kokonaislukuongelmaa voidaan kuvata graafisesti kuvassa 6 esitetyllä tavalla. Hypertason $R_1 - R_4$ rajoittama hypertahokas A muodostaa ongelma-avaruuden. Tarkoituksena on löytää tavoitefunktion L_c minimiarvo. Jos muuttujilla ei ole kokonaisluku-ehdot, minimi toteutuu tavoitefunktion hypertason L_0 pisteessä P . Ongelma on tavallinen jatkuva lineaariongelma. Kun muuttujilla x_A on kokonaislukuvaatimus, optimiratkaisu löytyy pisteestä Q ja tavoitefunktiota kuvaa hypertaso L_1 . Muuttujien x_A ja x_B ollessa kokonaislukuja optimiratkaisu toteutuu pisteessä S ja tavoitefunktio on L_2 .

Pyöristämällä jatkuvan ongelman optimiratkaisu P lähemmäksi kokonaislukuksi saataisiin tulokseksi piste P^1 (1, 1). Tämä ratkaisu ei ole käypä, sillä rajaehto R_1 ei ole voimassa. Se on myös varsin kaukana optimaalisesta kokonaislukuratkaisusta, S (2, 3).



Kuva 6. Sekaluku- tai kokonaislukuoptimoinnin graafinen esitys.

Kokonaisluku- ja sekalukuoptimoinnin ongelmien ratkaisemiseksi on kehitetty lukuisia erityisalgoritmeja. Näistä laajan kuvauksen sovellutus esimerkkeineen ovat antaneet mm. Salkin (1975) ja Taha (1972). Joskus kokonaislukuoptimoinnin ongelma on luonteeltaan sellainen, että normaalin simplex-algoritmin kehittämä, kuljetusalgoritmi, tuottaa kokonaislukuratkaisun. Näin on laita esimerkiksi kuljetusongelman, siirtokuljetusongelman ja kohdistusongelman kohdalla. Jos ongelma on muotoiltavissa ko. problemeiksi, saadaan kokonaislukuratkaisu suoraan.

Kokonaisluku- ja sekalukuohjelmoinnin erityisiä ratkaisutekniikoita ovat mm.

- Branch and Bound -algoritmit
- leikkaustasoalgoritmit
- osittamisalgoritmit
- ryhmäteoreettiset algoritmit

Kokonaislukuprobleema voidaan monesti muokata sellaiseen muotoon, että se on ratkaistavissa myös dynaamisen ohjelmoinnin keinoin (ks. liitekuva 1, s. 29). Tällöin kyseistä ongelmaa varten on kehitettävä oma *ad hoc* -algoritminsa, sillä dynaamisen ohjelmoinnin standardialgoritmeja ei yleensä ole olemassa.

Branch and Bound- sekä leikkaustasoalgoritmit ovat saaneet laajimman joukon tietokonesovelluksia ja ne

sisältyvät lähes jokaiseen kaupalliseen ohjelmointipakettiin.

Teoreettiselta kannalta tarkasteltuna kokonaisluku- ja sekalukuohjelmoinnin ominaispiirteitä ovat:

- Kokonaislukurajoitusten lisääminen supistaa aina käypää ongelma-avaruutta
- Mahdollisten ratkaisuyhdistelmien lukumäärä kasvaa räjähdysmäisesti ongelman koon suureutuessa
- Kokonaislukumuuttujien avulla on mahdollista mallittaa mita moninaisimpia loogisia ehtoja sisältäviä ongelmia
- Kiinteitä tai hyppäyksittäin kiinteitä tekijöitä voidaan sisällyttää problemaan
- Ei-konvekseja ongelma-avaruuksia voidaan muotoilla kokonaislukumuuttujien avulla
- Kokonaislukuja sisältävän probleeman ei tarvitse välttämättä olla lineaarinen
- Kokonaislukuprobleema tai sekalukuprobleema ei ole duaalisesti käypä, joten ratkaisusta saatava taloudelli-

nen informaatio on usein hämärää tai se ei ole mielekäästä

- Kokonaislukuongelman ja sekalukuongelman herkkyyksianalyysi on tarkoituksenmukaisinta ja järkevintä tehdä muuttamalla kyseeseen tulevia tavoitefunktioita tai \mathbf{b} -vektorin arvoja ja ratkaista ongelma uudelleen, minkä jälkeen vertaillaan tuloksia. Tämän menettelyn perustana on seikka, että muuttujien kokonaislukuvaatimus muuttaa ongelma-avaruuden sellaiseksi, että perinteinen herkkyyksianalyysi ei anna järkeviä tuloksia
- Nykyiset ratkaisutekniikat pystyvät käsittelemään enintään muutamien satojen muuttujien suuria kokonaislukumalleja kustannuksiltaan järkevän laskenta-ajan puitteissa
- Kokonaislukumalleja käytettäessä on oikean ratkaisutekniikan valinnan kanssa lähes yhtä tärkeää valita oikea strategia, jossa ongelman erityispiirteet otetaan huomioon. Näissä voidaan menestyksellisesti käyttää heuristisia menetelmiä.

6 MENETELMIEN ARVIOINTI

6.1 Soveltuvuus teoreettiselta kannalta

Jos kappaleessa 5.2 kuvatus tutkimusongelman ratkaisemisessa käytetään tarkastelun kohteina olevia matemaattisen ohjelmoinnin menetelmiä ja tarkastellaan tuloksia hyvälle puunhankinnan suunnittelualgoritmille asetettuja vaatimuksia vasten, saadaan taulukossa 1 kyllä-ei-asteikolla esitetyt eroavuudet.

Kaikki tarkastellut algoritmit täyttävät kvantitatiivisuuden, käyppyyden ja kokonaisoptimaalisuuden vaateet. Kvantitatiivisuuden osalta on todettava, että ne operatiiviset muuttujat, jotka ovat puunhankkijan päätettävällän alaisina päätöstilanteessa, ovat lähes poikkeuksetta mitattavissa kvantitatiivisten tulojen avulla. Sitä kautta ne ovat aina nyt tarkasteltavien menetelmien käyttöalueella. Jotkut ei-quantitatiiviset suuret ovat muunnettavissa mitattaviksi esimerkiksi subjektiivisten todennäköisyyksien tai ni. maksuhallituksen määrittämisen avulla. Näissä tapauksissa, mikäli ko. tekijää halutaan tarkastella, käytetyn mittarin validiteetin suhteen on oltava erityisen huolellinen tulosten tulkinnassa.

Tavoiteoptimoinnin erityispiirre on, että sen avulla saadaan muutoin ei-käyvästä ongelmasta käypä sallimalla poikkeamia tavoitefunktioiden arvoihin. Tämä ei tietenkään poista alkuperäisen ongelman ei-käyppyyttä. Se osoittaa vain, kuinka lähelle eri tavoitteita on optimaaliratkaisussa mahdollista päästä. Puunhankinnan kustannusfunktiossa tämä voidaan tulkita esimerkiksi siten, että saadaan pienin mahdollinen lisäkustannus, jonka avulla joku ristiriidassa oleva tavoite, vaikkapa työllistämisvelvoite, on saavutettavissa. Toisaalta mikäli tavoiteohjelmoinnin ongelman muotoilu on sellainen, että jo alkuperäisongelma on käypä, poikkeamafunktion arvo osoittaa, kuinka paljon tavoitteesta on varaa poiketa, jotta ongelma muuttuu ei-käyväksi. Jos esimerkiksi tärkeintä on turvata puunsaanti ja seuraavaksi tärkeintä tehdä se mahdollisimman edullisesti, tavoiteohjelmointi antaa tulokseksi tarvittavan puumäärän halvimmin kustannuksin. Pelkkä puunsaannin turvaaminen ei välttämättä tapahdu halvimmin kustannuksin.

Eriyisesti tavoiteohjelmoinnin teoreettisen soveltamisen osalta on painotettava, että se ei ole menetelmä, joka määrittäisi eri tavoitei-

den keskinäisen paremmuusjärjestyksen. Tämä seikka liittyy tavoiteoptimoinnissa kokonaisoptimaalisuuteen siten, että matemaattisessa mielessä kokonaisoptimi kyllä saavutetaan, mutta mikäli tavoitteiden hierarkiasta ei ole varmaa tietoa, perusongelman ratkaisun optimaalisuudestaan ei silloin saada varmuutta.

Kokonaisluku- tai sekalukuoptimointiongelman parametrinen tai tavoiteoptimointityyppinen käsittely on teoriassa täysin mahdollista. Käytettävissä olevissa kokonaisluku-algoritmeissa tätä mahdollisuutta ei yleensä kuitenkaan ole laskentarutiiniin sisällytettyinä. Ongelman tarkoituksenmukaisella muotoilulla voidaan tästä vaikeudesta kuitenkin päästä, varsinkin tavoiteoptimointina toteutettuna.

Taloudellisen informaation tulkinallinen puutteellisuus tavoiteohjelmoinnissa johtuu siitä, että ongelmaa ei välttämättä käsitellä taloudellisin käsittein tai edes yhteismittallisin suurin. Mikäli tavoitefunktiossa on yksinomaan taloudellista tietoa, sen taloudellinen tulkinta on tällöin mahdollinen.

Jokaiseen lineaariseen optimointiin primaaliohjelmaan liittyy aina duaaliohjelma, jonka optimiratkaisu on sama kuin primaaliohjelman ratkaisu. Kokonaisluku- tai sekalukuoptimoinnin kohdalla näin ei aina ole, mutta jos ongelma on muotoiltu siten, että voidaan käyttää esimerkiksi kuljetusalgoritmeja, joka tuottaa automaattisesti kokonaislukuratkaisun, myös tulosten taloudellinen tulkinta on mahdollinen. Tämä johtuu siitä, että rajaehtoina olevat hypertasot kulkevat ko. kokonaislukupisteiden kautta. Ko. pisteet ovat silloin konveksin ongelma-avaruuden kärkipisteitä. Tästä seuraa, että myös esimerkiksi varjohinnat ovat kokonaislukuarvoja.

Tapauksissa, joissa käytetään jotain muuta ratkaisualgoritmeja, esimerkiksi Branch and Bound- tai leikkaustasoalgoritmeja, ratkaisun tuloksena saadaan alkuperäisen ongelma-avaruuden joku sisäpiste, joka on kokonaisluku (esimerkiksi piste S, kuva 6, s. 18). Tällöin ongelmalla ei ole käypää duaaliratkaisua, vaan syntyy niin kutsuttu duaalisuuskuilu, josta myös aiheutuu, että ongelman taloudellinen tulkinta voi olla vaikeaa. Tämä voidaan päätellä seuraavasti:

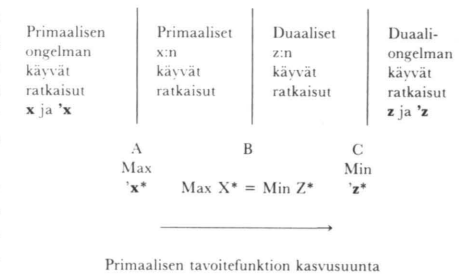
naislukuratkaisu. Duaaliohjelman vastaavat arvot ovat z_{\min}^* jatkuvalla ratkaisulla ja z_{\min}^* kokonaislukuille. Tällöin komplementaarisuuserian mukaan (Hillier ja Lieberman 1980, s. 99–102)

$$\text{Primaalinen } x_{\max}^* = z_{\min}^* \text{ Duaalinen} \quad (14)$$

mutta koska kokonaislukuratkaisu on aina yhtä rajoitettu tai rajoitetumpi kuin vastaava jatkuva ratkaisu, saadaan ehdot

$$\begin{aligned} x_{\max}^* &\geq x_{\max}^* \text{ ja} \\ z_{\min}^* &\leq z_{\min}^* \end{aligned} \quad (15)$$

Graafisesti tämä on havainnollistettavissa seuraavasti:



Suoralla B on jatkuville ratkaisuille komplementaarisuusehto voimassa ja suorien A ja C välialue muodostaa kokonaislukuratkaisun duaalisuuskuilun. Duaalisuuskuilun johdosta varjohinnoille ei voida antaa selkeää tulkintaa.

Parametrinen optimoinnin ei-deterministisyys tässä tapauksessa on tulkitettu siten, että vaikka optimialiratkaisu parametrin eri arvoilla ovatkin deterministisiä tietyillä väleillä, kaikki optimaaliset arvot ovat tiedossa. Jos nyt esimerkiksi tiedetään jonkin parametrin kertoimen todennäköisyysjakauma ja sille voidaan määrittää odotusarvo, saadaan optimaaliselle ratkaisulle eräänlainen stokastinen komponentti.

Yhdistelmänä eri ohjelmointimenetelmien teoreettisesta soveltuvuudesta voidaan todeta seuraavaa.

Puunhankintaongelmien analysointia silmällä pitäen taulukossa 1 ”kyllä”-sana tulkitetaan menetelmälle positiiviseksi arvioksi ja ”ei” negatiiviseksi. Tämän perusteella tavoiteohjelmointi saa eniten kyllä- ja vähiten ei-

Taulukko 1. Ratkaisualgoritmien teoreettisten ominaisuuksien arviointi.

Ratkaisun ominaisuus	Standardi lin. opt.	Parametrinen optimointi	Tavoiteoptimointi	Kokonais- tai sekalukuopt.
Kvantitatiivisuus	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
Käyppyy	kyllä	kyllä	kyllä ¹⁾	kyllä
Kokonaisoptimaalisuus	kyllä	kyllä	kyllä ²⁾	kyllä
Useita tavoitteita huomioon	ei	ei	kyllä	ei
Tavoitteiden ristiriitaisuus	ei	ei	kyllä	ei
Kokonaislukumuuttujat	ei	ei ³⁾	ei ³⁾	kyllä
Tulosten taloudellinen tulkinta	kyllä	kyllä	ei ⁴⁾	ei ⁴⁾
Eri mittayksiköt mahdollisia	ei	ei	kyllä	ei
Ei-deterministisyys	ei	kyllä ⁵⁾	ei	ei

¹⁾ matemaattisessa mielessä ongelma on aina käypä

²⁾ matemaattisessa mielessä ratkaisu on kokonaisoptimi

³⁾ kokonaisluku-algoritmit eivät yleensä käsittele ongelmaa parametrisesti tai tavoiteoptimointiongelmana

⁴⁾ erikoistapauksissa mahdollinen

⁵⁾ antaa vaihteluvälit eri ratkaisuille

Olkkoon x_{\max}^* jatkuvan primaaliohjelman optimiratkaisu ja x_{\max}^* saman ongelman optimaalinen koko-

arvioita ja vaikuttaa sen vuoksi lupaavimmalta menetelmältä jatkosovellutuksia ajatellen. Mielessä on kuitenkin pidettävä, että kaikki tarkastelun kohteena olleet mallit ovat lineaarimalleja ja siten samaa malliperhettä. Näin niiden yhdisteleminen on teoreettisesti mahdollista. Tätä taustaa vasten tarkastellen puunhankinta-ongelman käsittelyyn parhaiten soveltuisi malli, joka muotoiltaisiin tavoiteoptimointia silmällä pitäen, siihen sisällytettäisiin kokonaislukujen käyttömahdollisuus sekä laajat parametriset jälkitarkastelumahdollisuudet. Vaikeimmaksi pulmaksi jäisivät ainoastaan erimittaisia suureita käytettäessä syntyvät taloudellisen informaation tulkintavaikkeudet.

6.2 Soveltuvuus käytännön kannalta

Taulukossa 2 on esitetty seitsemän vaatimusta, joiden suhteen tarkasteltavia menetelmiä arvioidaan kolmiluokkaisella hyvä-, tyydyttävä- ja huono-asteikolla.

Standardi lineaarinen optimointi soveltuu puunhankkijan käyttöön suunnitteluvälineeksi korkeintaan tyydyttävästi siitä syystä, että kustannusten minimoointi ei useinkaan ole tavoite, johon tulisi ehdottomasti pyrkiä. Näin yksitavoitteinen malli kuvaa huonosti vallitsevaa todellisuutta. Toisaalta puunhankintamalleilla suoritettavat laskelmat kuten myös käytännön kokemukset ovat osoittaneet, että optimin (ts. kustannusminimin) ympäristössä kustannusmuutokset ovat laajahkolla alueella jokseenkin vähäisiä, korkeintaan muutaman prosenttiyksikön suuruisia. Pelkkä kustannusten minimoointi ei siten ole riittävä peruste mallin käyttämiseksi, kos-

ka hyvin lähelle minimiä päästään myös muiden suunnittelurutiinien avulla.

Puunhankintaongelma on yleensä helppo muotoilla eri muuttujien suhteen lineaarimalliksi. Erityistä huomiota on kiinnitettävä silloin rajoitusyhtälöiden lineaarisuuteen koko tarkasteluvälin puitteissa. Tämä seikka tietenkin rajoittaa kaikkien lineaarimallien käyttöä. Mikäli mallissa oleva epälineaarisuus on separoituva, se voidaan linearisoida. Tämä lisää kuitenkin huomattavasti mallin kokoa.

Aikatekijä on helppo ottaa mallittamisessa huomioon. Standardimallia on helppo käyttää ja sen antamat tulokset selkeitä tulkita myös taloudellisessa mielessä. Edelleen standardin lineaarisen optimoinnin ohjelmistopakettit sisältävät miltei mihin tahansa tietokonejärjestelmään, myös pöytä tietokoneiden kokoluokassa, joten atk-ympäristösidonnaisuus ei ole rajoittava tekijä. Standardiohjelmistojen käyttökustannukset ovat varsin edulliset. Standardimallia käytettäessä mallikoko jää yleensä myös muita pienemmäksi.

Parametrinen ohjelmointi soveltuu puunhankinnan ongelmiin standardimallia paremmin varsinkin, jos vallitsee epävarmuus kustannuseroisten tai resurssien todellisesta suuruudesta. Koska kaikki optimiratkaisut ko. parametrin suhteen tunnetaan, voidaan valita se parametrin arvo, jonka parhaiten otaksutaan kuvaavan vallitsevaa todellisuutta.

Parametrisoitu malli on huomattavasti hankalampi käyttää kuin muut mallit, sillä se antaa tuloksena moninkertaisen määrän tietoa. Tulosten tulkittavuus on hyvä ja selkeä, mutta liian pitkälle vietyinä parametrinen optimoinnin koko tietomäärää ei voida täysimittaisesti käyttää hyväksi. Parametrinen käsit-

tely vaatii yleensä suuren tietokoneen monipuolisen laskentakapasiteetin ja muistitilaa runsaasti. Myös laskentaan kuluva aika on huomattavasti suurempi ja käyttö sitä kautta kalliimpaa. Saatava lisätieto ei ehkä ole aina siihen uhrattujen kustannusten arvoinen. Parametrisoitu malli sinänsä ei kooltaan poikkea standardimalleista, mutta vaatii huomattavasti enemmän työtä.

Tavoiteoptimoinnin käytön suurin heikkous käytännön kannalta liittyy tulosten taloudellisen tulkinnan vaikeuteen ja siihen, että mallin käyttäjän on tiedettävä eri tavoitteiden arvojärjestys, jotta tuloksista saataisiin paras mahdollinen hyöty. Muiden ominaisuuksien osalta tavoiteohjelmointi on vähintään yhtä hyvä menetelmä kuin muut tarkasteltavat menetelmät. Sen käyttökustannukset muodostunevat jonkin verran kalliimmiksi, jos halutaan ratkaisuja vaihtoehtoisia painokertoimia käyttäen. Mallin koko ei tavoiteoptimoinnissa poikkea standardimallista tai parametrimalista, sen muotoilu on vain erilainen.

Kokonaislukumalli soveltuu tarkasteltavista malleista kaikkein huonoimmin kuvaamaan käsiteltävää ongelmakokonaisuutta. Mikäli mallia sovelletaan suppeampaan osa-

ongelmaan, kuten kuljetusoptimointiin tai kohdistamistehtävään esimerkiksi hakkuumiesten tai koneiden ketjuttamisessa, sen käyttö on ehkä perusteltua. Sekalukumalli sen sijaan soveltuu paremmin, mikäli kokonaislukumuuttujien määrä pysyy kohtuullisena mallin muuhun kokoon verrattuna. Kokonais- tai sekalukumallit ovat huomattavasti vaikeampia muotoilla kuin muut mallit. Tulosten tulkinta ei ole aina selkeä taloudellisen informaation osalta. Mallit vaativat käytettävältä atk-järjestelmältä runsaasti muistitilaa, sillä suuri joukko välituloksia on koko ajan pidettävä käyttövalmiina muistissa. Laskentaajat kokonaislukualgoritmeja käytettäessä ovat pitkät ja operointi sen vuoksi kallista. Loogisten ehtojen sisällyttämisen kasvattaa mallien kokoa varsin nopeasti.

Yhdistelmänä taulukosta 2 voidaan todeta, että käyttäjän kannalta parhaimmat menetelmät ovat tavoiteohjelmointi ja standardi lineaarinen ohjelmointi. Jälkimmäisen suurin heikkous on sen yksipuolisuus ko. ongelman kuvaamisessa, tavoiteohjelmoinnin heikkous taas se, että eri tavoitteiden arvojärjestys on pitkälti käyttäjän subjektiivisten arvostusten varassa.

Taulukko 2. Ratkaisualgoritmien soveltuvuus käytännön vaatimuksiin.

Vaatus	Standardi lin. opt.	Parametrinen optimointi	Tavoite-optimointi	Kokonais- tai sekalukuopt.
Ongelmakenttään soveltuvuus	tyyd.	hyvä	hyvä	tyyd.
Muotoiltavuus	hyvä	hyvä	hyvä	tyyd.
Aikatekijän huomioonotto	hyvä	hyvä	hyvä	hyvä
Käytön helppous	hyvä	tyyd.	hyvä	tyyd.
Tulosten tulkittavuus	hyvä	hyvä	tyyd.	tyyd.
Atk-ymp. sidonnaisuus	hyvä	tyyd.	hyvä	tyyd.
Operoinnin halpuus	hyvä	huono	tyyd.	huono

7 PÄÄTELMÄT OSATUTKIMUKSISTA

Tämän tutkimuksen empiirisen osan muodostaa kolme erillistä tutkimusta, jotka on esitetty osassa B. Niissä kaikissa on käytetty matemaattista optimointia.

Kasauksen kehittämistutkimuksessa (Mikkonen 1978 a ja 1978 b) käytettiin simulointia korjuuketjujen tuotosten, resurssitarpeen ja kustannusten generoimiseksi eri tarkasteluvoosien tasolle. Standardin lineaarisen optimointimallin avulla tarkasteltiin toisessa vaiheessa kustannukset optimoivaa korjuuketjujakaumaa eri vuosina tyyppiolosuhteissa. Kolmannessa vaiheessa kustannus-hyötyanalyysin keinoin pyrittiin määrittämään eri kehittämisvaihtoehtojen keskinäinen paremmuus. Tuloksena todettiin, että eniten kehittämisvaihtoehtojen keskinäiseen paremmuuteen vaikuttavat eri tekijöille annetut painoarvot. Tähän samaan ongelmaan törmätään tavoiteohjelmointia käytettäessä. Tavoiteohjelmointi olisikin ollut vaihtoehtoinen tapa tarkastella kehittämisvaihtoehtojen paremmuutta analyttisesti, jos sopiva ohjelmointipaketti tuolloin (v. 1977) olisi ollut käytettävissä. Tavoiteohjelmointi käytettynä kasauksen kehittämisiongelmassa olisi esimerkiksi antanut eri kehittämisvaihtoehtojen kustannukset suoraan käytettyjen painoarvojen funktiona. Tätä pidettiin osatutkimuksessa käytetyn kolmikerroksisen tutkimusmetodin eräänä puutteena. Työssä käytetty lineaarimalli toimi hyvin ja antoi tulokset, jotka täyttivät ne vaatimukset, jota mm. taulukossa 2 (s. 22) standardille lineaariparametrisoinnille on asetettu. Tämän perusteella voidaan standardien lineaarimallien käyttöä suositella kyseisyyntyyppisten resurssien allokointiongelmien ratkaisemiseen. Jälkianalyysit on pelkkää lineaarista ohjelmointia käytettäessä suoritettava ko. osatutkimusta laajempina.

Sahapuun korjuumenetelmätutkimuksessa (Mikkonen 1980) käytettiin parametrisista optimointia karkealla tasolla korjuumenetelmien kustannusrajojen määrittämisessä. Ongelmassa tarkasteltiin korjuuta kahta kokoa olevalle sahalaitokselle ja otettiin huomioon hypoteettisten resurssirajoitusten lisäksi

myös korjuumenetelmistä aiheutuvat laatu-tekijät. Tavoitefunktiossa maksimoitiin tuottoja. Tavoitefunktion korjuumenetelmittäisiä kustannuskertoimia käsiteltiin parametrisesti, jotta saataisiin määritetyksi kustannusrajat, joiden puitteissa ko. korjuumenetelmä tulee käyttöön tai poistuu kantaratkaisusta jonkun muun korjuumenetelmän korvaamana.

Tutkimuksen päätelmänä todetaan parametrisen optimointimallin soveltuvan kyseiseen ongelmaan suhteellisen hyvin. Vaikeutena todetaan sopivan parametrisen ohjelmoinnin sisältävän valmisohjelmiston puute tutkimushetkellä. Tämä ratkaistaan käyttämällä tavanomaista simplex-algoritmipakettia parametrisesti vaihtoehtoisia laskelmia suorittamalla, mikä tekee laskennasta kalliimman tulosten luotettavuuden siitä kuitenkin kärsimättä.

Kolmannessa osatutkimuksessa (Mikkonen 1982 a) kehitettiin lineaarimalli, jossa tarkasteltiin runkojen tai kokopuiden käsittelyyn soveltuvan terminaalin perustamisvaihtoehtoja suuren tehdasintegraatin yhteydessä. Ratkaisumenetelmä oli standardi lineaarinen optimointi (Mathematical Programming . . . 1977), jossa tarkastelut suoritettiin kuuden vaihtoehtoisen tavoitefunktion tasolla.

Käytetyn optimointimenetelmän todettiin toimineen tutkimuksen yhteydessä hyvin ja antaneen luotettavia tuloksia. Kyseinen tarkastelu muodosti varsin laajan kokonaisuuden, sillä se sisälsi periaatteessa kaikki toiminnot, jotka on esitetty kuvassa 2 (s. 13). Malli oli kooltaan kuitenkin vain pienehkö keskisuuri malli, sisältäen 283 rajoitusyhtälöä ja 980 muuttujaa. Nykyiset ohjelmistopakettit pystyvätkin ratkaisemaan huomattavasti suurempia malleja kuin yksikään näissä tutkimuksissa käytetty malli oli.

Esitetyn teoreettisen pohdiskelun ja osatutkimuksista saadun kokemuksen perusteella todetaan vastauksena tutkimustehtävän asettamisen yhteydessä esitettyyn kolmeen menetelmien soveltumislueita koskevaan kysymyksen seuraavaa.

1. Mikä tahansa tarkastelluista tai käytetyistä tutkimusmenetelmistä soveltuu puun korjuun ja kuljetuksen sekä tehdaskäsittelyn suunnittelussa kustannusten minimointitehtävän ratkaisemiseen. Menetelmää valittaessa on otettava huomioon ensi sijassa se, onko tarvetta käsitellä useita tavoitteita, jotka eivät ole yhteismitallisia. Mikäli näin on tehtävä, paras menetelmä on tavoiteohjelmointi. Jos tavoitefunktio voidaan yksikäsitteisesti ilmaista kustannusfunktiona, paras menetelmä on standardi lineaarinen optimointi varustettuna riittävin jälkianalyysimahdollisuuksin. Parametrisointia tässä tapauksessa ei kannata harjoittaa liian suurissa määrin, sillä laskennan lisäkustannukset rutiininuomiin hyötyihin verrattuna muodostuvat liian suuriksi. Kokonaislukumenetelmien käyttö samasta syystä rajautuu pois. Mallin koko tulee kokonais- tai sekalualgoritmien nykyiseen kapasiteettiin verrattuna liian suureksi.
2. Kehittämistä palvelevien vaihtoehtoisten korjuu-, kuljetus- ja puunkäsittelymenetelmien analysointiin soveltuu parhaiten parametrisen ohjelmointi. Tämä siitä syystä, että kehittämisen kohteena oleviin menetelmiin liittyy usein suuria kustannuksellisia epävarmuustekijöitä. Menetelmien käytön edullisuuden kus-

tannusrajat saadaan selville kaikissa optimaalisissa ratkaisuissa. Standardi lineaarinen optimointi antaa liian suppeat tulokset. Mikäli kehittämisiongelma sisältää useiden tavoitteiden saavuttamispäämäärän, tavoiteohjelmointi on toinen käyttökelpoinen menetelmä. Kokonaislukuohjelmointi ei sellaisenaan soveltu kehittämisvaihtoehtojen tarkasteluun. Kokonaislukumuuttujien käyttömahdollisuus tulisi sisällyttävään analyysimenetelmään. Sekalukuohjelmointi on siksi kolmas, mutta huonoin vaihtoehto ratkaisualgoritmien kehittymättömyyden vuoksi.

3. Kaikki tarkastellut analyysimenetelmät soveltuvat investointien suunnittelun työvälineeksi. Esimerkiksi jos investointi kokopuiden käsittelylaitokseen voidaan muotoilla joko-tai-päätökseksi, sekalukuohjelmointi binäärisiä päätösmuuttujia käyttäen soveltuu parhaiten ja investointipäätös tehdään saadun kustannustiedon perusteella. Parametrisista ohjelmointia soveltaen saadaan selville kustannusten vaihteluvälin vaikutusten lisäksi myös tarvittavan laitoksen tai koneiden puunkäsittelyteho jatkuvana muuttujana aikayksikössä. Rajoituksena tässä on mallin lineaarisuusoletukset, jotka on huolellisesti tutkittava ja mahdolliset epälineaarisuudet linearisoitava ennen analyysijä.

8 YHDISTELMÄ JA JATKOSELVITYKSET

Operaatiotutkimuksen menetelmät ja erityisesti matemaattinen ohjelmointi muodostavat monipuolisen ja erittäin käyttökelpoisen kvantitatiivisten ongelmien analyysivälineistön. Ne soveltuvat myös metsällisiin ongelmiin. Mitä moniulotteisempi ja laajempi tarkastelun kohteena oleva ongelma-alue on, sitä vaikeampaa on sen miettäminen ja hallinta inhimillisin keinoin.

Puunhankinnan ja puun tehdaskäsitelyn eri toiminnot lähestyvät kasvavassa määrin teollisia tuotantoprosesseja, jossa toimintamahdollisuuksia rajoittavat mitä erilaisimmat tekniset ja taloudelliset tosiasiat. Omat erityispiirteensä ongelma-alueeseen luo metsällinen ympäristö mm. puuntuotannollisten lisärajoitusten muodossa. Kokonaisuus on entistä vaikeampi hallita ilman tehokasta analyysivälineistöä.

Tässä tutkimuksessa tarkastellun tehokkaan analysointivälineistön käyttöön liittyy eräitä yleisiä rajoituksia, jotka on pidettävä mielessä erityisesti tuloksia tulkittaessa:

- Vallitsevan todellisuuden kuvaaminen mallilla on aina sen yksinkertaistamista.
- Mallirakennelman sinänsä loogisen ja aukottoman järjestelmän puiteissa tieto tiivistetään edelleen muutamaksi päätösmuuttujaksi, joiden perusteella operatiiviset päätökset tehdään. Tästä seuraa, että mikäli käytön perusteet eivät ole oikeat, myöskään saadut tulokset eivät ole päteviä.

- Todellisuutta kuvaavat mallit ovat aina laatijansa näkemyksiä ko. ongelmasta. Eri henkilöt saattavat mallittaa saman ongelman eri tavalla.

Puunhankinnan ja -käsitelyn ongelma-alueen soveltuvia muita mallirakennelmia (vrt. Mikkonen 1982 b) tulisi tutkia. Hedelmällisintä olisi jakaa ongelmakokonaisuus loogisiin osiin ja pyrkiä löytämään kutakin osaa kuvaava paras mahdollinen malli ja sille ratkaisu. Tällöin sovellettavia mallittamis- ja ratkaisutekniikoita olisivat esimerkiksi *todennäköisyysmallit*, joista mm.

- Markov-ketjut
- jonoteoria ja jonomallit
- päätöspuut

ovat malleja, jotka soveltuvat esimerkiksi metsäkoneiden luotettavuuden maksimointiin ja huoltokustannusten minimointiin, työ-koneiden ja kuljetusten ajoitusongelmiin ja kapasiteetin mitoitus tehtäviin.

Verkkoeteoria ja kohdistusmallit soveltuvat kuljetusten suunnitteluun ja koneiden, työvoiman ja muiden resurssien ketjuttamiseen.

Tavoiteohjelmointia voitaisiin soveltaa esimerkiksi energiapuun hyväksikäytön kannattavuustarkasteluissa.

Kaikkien mainittujen analyttisten menetelmien ehdottomana käyttöedellytyksenä ovat luotettavat perustiedot.

9 KIRJALLISUUSLUETTELO

- ANDERSSON, S. 1971. Models for forest management plans. Skogsarbeten. Meddelande 7. Stockholm.
- BARANOVSKII, V. A. 1978. New methods of investigation to aid logging. Minlesprom. Lesnaja Promyshlennost 9. Moscow.
- BARE, B. B. & NORMAN, E. L. 1969. An evaluation of integer programming in forest production scheduling problems. Purdue University Agr. Exp. Station. Research Bulletin 847. Lafayette.
- BEIGHTLER, C., PHILLIPS, D. & WILDE, D. 1979. Foundations of Optimization. Prentice-Hall. Series in Industrial and Systems Engineering. Englewood Cliffs. New Jersey.
- CARLSSON, B. 1968. Rutiner för kortsiktig planläggning av drivningsarbete. Skogsarbeten. Meddelande 5. Stockholm.
- CHARNES, A., COOPER, W. W. & FERGUSON, R. O. 1955. Optimal Estimation of Executive Compensation by Linear Programming. Management Science 1.
- CLAPHAM, J. C. 1960. Operations research can help the logger. Canadian Pulp and Paper Industry 12(7). Ottawa.
- CORCORAN, T. J. 1969. Scheduling within harvesting systems improved with mathematical models. Conf. Proceedings. Sept. 1968. ASAE. East Lansing. Michigan.
- DANE, C. W. 1966. Operations Research - a Managerial Decision-making-tool for the Forest Industry. Forest Industries 93 (2) and 98 (6) and 93 (10).
- DONELLY, R. H. 1963. Mathematical Programming in the Management of Logging Operations. Proceedings. Society of American Foresters meeting. Wood, Water and People. Boston.
- DYER, A. A., HOF, J. G., KELLY, J. W. & ALWARD, G. S. 1979. Implication of Goal Programming in Forest Resource Allocation. Forest Science 25 (4). Washington D. C.
- DYKSTRA, D. P. 1976. Timber Harvest Layout by Mathematical and Heuristic Programming. Ph. D. Dissertation. Oregon State University. Corvallis.
- & RIGGS, J. 1977. An Application of Facilities Location Theory to the Design of Forest Harvesting Areas. AIIE Transactions 9 (3).
- ELOVAINIO, A. & VÄISÄNEN, U. 1972. Puutavaran käsittelypaikan sijoitus koneellisissa korjuuketjuissa. Locating the timber handling site in mechanized harvesting systems. Metsätehon tiedotus 313. Helsinki.
- ESKELINEN, A., MELKKO, M. & VESIKALLIO, H. 1976. Kokopuuna korjuun taloudellisuus. Economicalness of harvesting of whole trees. Metsätehon tiedotus 341. Helsinki.
- & PELTONEN, J. 1977. Puunhankinnan suunnittelumalleilla suoritettava raaka-puuvarastojen koon optimointi. Optimization of the size of roundwood storages performed by logging planning models. Metsätehon tiedotus 343. Helsinki.
- MIKKONEN, E., MYLLYNIEMI, A. & PELTONEN, J. 1978. Eri runkopuunkorjuumenetelmien taloudellinen kehitys vuosina 1978-1986.

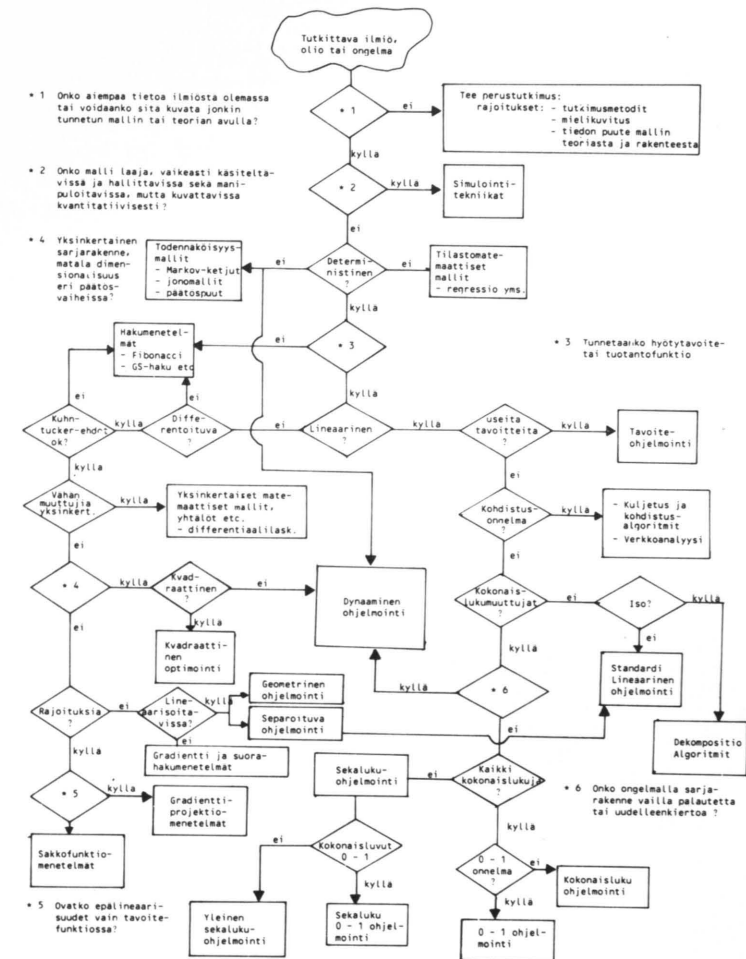
Development of the economicalness of stemwood harvesting methods in 1978-1986. Metsätehon tiedotus 351. Helsinki.

- & PELTONEN, J. 1980. Suunnittelusysteemi puunkorjuun menetelmävälintaan. A planning system for method selection in timber harvesting. Metsätehon katsaus 16/1980. Helsinki.
- & KESKINEN, S. 1981. Eräiden matemaattisten menetelmien käyttöalueet. Julkaisematon moniste. Metsäteho. Helsinki.
- FIELD, D. B. 1973. Goal programming for forest management. Forest Science 19 (2): 125-138. June 1973. Washington D. C.
- 1977. Linear Programming: Out of the Classroom and into the Woods. Journal of Forestry. June 1977. Washington D. C.
- GANGULI, B. 1970. Linear programming as an aid for pulpwood procurement and scheduling. Indian Forest 96 (10).
- GARFINKEL, R. & NEMHAUSER, G. 1972. Integer Programming. John Wiley & Sons. New York.
- Goal programming. What and Why. Serie of Articles. Journal of Forestry 75 (6). Washington D. C.
- GOULET, D. V., IFF, R. H. & SIROIS, D. L. 1978. State-of-the-art report: tree-to-mill forest harvesting simulation models: where are we? Forest products journal. Auburn.
- HILLIER, F. & LIEBERMAN, G. 1980. Introduction to Operations Research. Holden-Day. Inc. San Francisco.
- IJIRI, Y. 1965. Management goals and accounting for control. North Holland Publ. Co. Amsterdam.
- IUFRO. 1978. Simulation Techniques in Forest Operational Planning and Control. Proceedings. Working Party S. 3.04.01. The Netherlands.
- KAO, C. & BRODIE, J. D. 1979. Goal programming for reconciling economic, even-flow, and regulation objectives in forest harvesting scheduling. Canadian Journal of Forest Research 9 (4). Ottawa.
- KEIPI, K. 1977. Transfer pricing for log allocation in a decentralized forest products firm. Commun. Inst. For. Fenn. 89 (2). Helsinki.
- 1978. Approaches for functionally decentralized wood procurement planning in a forest products firm. Commun. Inst. For. Fenn. 93 (4). Helsinki.
- KILKKI, P. 1968. Income oriented cutting budget. Acta For. Fenn. 109. Helsinki.
- , & VÄISÄNEN, U. 1969. Determination of the optimum cutting policy for the forest stand by means of dynamic programming. Acta For. Fenn. 102. Helsinki.
- KUUSELA, K. & SIITONEN, M. 1977. Puuntuotanto-ohjelmat Etelä-Suomen piirimetsäläytakuntien alueille. Folia For. 307. Helsinki.
- LAAKKONEN, O. 1978. Taimitarhan toimintavaihtoehtojen valinnan liiketaloudellinen malli. An Economic Model for Selecting Production Alternatives in a Forest Nursery. Commun. Inst. For. Fenn. 93 (3). Helsinki.
- 1979. Optimal distribution of Regional Seedling Production Study. Tuotannon optimaalinen ja-

- kaminen alueen taimitarhoille. Taloudellisuus-
tarkastelu. Commun. Inst. For. Fenn. 95 (5).
Helsinki.
- LEE, S. M. 1972. Goal Programming for Decision Analysis. Auerbach Publishers Inc. Philadelphia.
- LIITSCHWAGER, J. M. & TCHENG, T. H. 1967. Solution of a Large-Scale Forest Scheduling Problem by Linear Programming Decomposition. Journal of Forestry 65 (9). Sept. 1967. Washington D. C.
- LJUNGMAN, L. 1971. A model and algorithms for scheduling of logging areas. Royal College of Forestry. Department of Operational Efficiency. Research Notes 45. Stockholm.
- LOKKI, O. 1978. Matemaattinen ohjelmointi I-II. Ota-Data. Espoo.
- LOUTO, M. & MYLLYNIEMI, A. 1977. Monitoimikoneiden tuotosten ja yksikkökustannusten laskentasyntesi. Metsätieteiden moniste 28. 10. 1977. Helsinki.
- LUSSIER, L. J. 1961. Planning and Control of Logging Operations. Laval University. Forest Research Found. Contributions 8. Quebec.
- LÖNNER, G. 1968. Ett system för kortsiktig planläggning av drivning, lagring och vidaretransport av rundvirke. Skogsarbeten. Meddelande 6. Stockholm.
- Mathematical Programming System. 1977. Cii, Honeywell Bull Manual. Louveciennes. France.
- McMILLAN, C. 1975. Mathematical Programming. John Wiley & Sons. New York.
- MIKKONEN, E. 1978 a. Puutavaran kasauksen kehittämisen vaihtoehdot. Development alternatives in the bunching of timber. Metsätieteiden tiedotus 352. Helsinki.
- 1978 b. Puutavaran kasauksen kehittämismuutosten edullisuus. Julkaisematon liseniaattitutkimus metsätalouden liiketieteessä. Helsinki.
- 1980. The choice of the Optimal Sawtimber Harvesting System. Oregon State University. Master of Forestry Paper. Corvallis.
- 1982 a. Kokopuiden tai -runkojen käsittelyasema Varkauden tehtaiden puunsyötössä. Metsäteho. Konekirjoite. Helsinki.
- 1982 b. Systeemanalyysi - hyödyntämätön mahdollisuus. "Miten metsää tulisi tutkia" -seminääri. Silva Fenn. 16 (1): 54-58.
- PELTONEN, J., SAVOLAINEN, R. & VESIKALLIO, H. 1975. Puunkorjuun kehitysennuste 1975-1984. Development prognosis for timber harvesting in 1975-1984. Metsätieteiden tiedotus 336. Helsinki.
- NEWNHAM, R. M. 1975 a. Logplan - a model for planning logging operations. Forest Management Institute. Information Report. FMR-X-77. Ottawa.
- 1975 b. The Fortran program for LOGPLAN. FMR-X-78. Ottawa.
- O'LEARY, J. 1973. Planning and Decisionmaking as Applied to Forest Harvesting. Proceedings of a symposium held sept. 11-12, 1972. Oregon State University. Forest Research Laboratory. Corvallis.
- PELTONEN, J. 1973. Monitoimikoneiden tuotoslaskentasyntesi. Metsätieteiden moniste 28. 12. 1973. Helsinki.
- 1981. Metsäosastojen tietojenkäsittelyn hajautus. Distribution of data processing in forest depart-

- ments. Metsätehon katsaus 21/1981. Helsinki.
- & VÄISÄNEN, U. 1972. Korjuun vuosisuunnitelma. One-Year Plan for Logging. Metsätieteiden tiedotus 311. Helsinki.
- & VESIKALLIO, H. 1974. Pystyleimikkovaran koon vaikutus raakapuun hankintakustannuksiin. Effect of the size of the standing timber stock on roundwood logging costs. Metsätieteiden tiedotus 333. Helsinki.
- PUKKILA, J. 1982. Metsäryhmän organisaatiomuutokset. Tuohitorvi n:o 5. Enso-Gutzeit Oy:n metsäryhmän henkilöstölehti. Lokakuu. Imatra.
- Rationaliseringskonferensen 1981. Skogsarbeten. Redogörelse 1. Stockholm.
- RUMPUNEN, H. 1980. Hakkeenkorjuu tavaralajikorjuun yhteydessä. Harvesting as chips in connection with shortwood harvesting. Metsätieteiden tiedotus 365. Helsinki.
- RYSÄ, M., SAVOLAINEN, R. & VÄISÄNEN, U. 1972. Puunkorjuun kehitysennuste 1970-luvulle. Forecast of the development of timber harvesting in the 1970s. Metsätieteiden tiedotus 314. Helsinki.
- SAASTAMOINEN, O. 1982. Economics of multiple-use forestry in the Saariselkä forest and fell area. Commun. Inst. For. Fenn. 104. Helsinki.
- SALKIN, H. M. 1975. Integer Programming. Addison-Wesley publishing Company. Reading. Massachusetts.
- SALMINEN, J. & VESIKALLIO, H. 1978. Puunkorjuutekniikan kehittämisen lähivuosina. SITRA. Sarja B, N:o 42. Helsinki.
- SHAMBLIN, J. & STEVENS, G. T. 1974. Operations Research. A fundamental approach. McGraw-Hill Book. Company. New York.
- SEPPÄLÄ, R. 1971. Simulation of Timber Harvesting Systems. Folia For. 125. Helsinki.
- SIMMONS, D. M. 1972. Linear Programming for Operations Research. Holden-Day Inc. San Francisco.
- TAHA, H. 1972. Operations Research. McMillan, New York.
- THOMPSON, E. F. 1968. Linear programming over time to establish least cost wood procurement schedules. VPI. Research Division. Bulletin 29. Blacksburg. Virginia.
- & HAYNES, R. W. 1971. A linear programming-probabilistic approach to decision making under uncertainty. Forest Science 17 (2). June 1971. Washington D. C.
- TILGHMAN, W. G. 1967. Linear programming approach to minimize wood procurement costs for integrated forest products firm. MF-paper VPI. Blacksburg. Virginia.
- VESIKALLIO, H. 1981. Metsäteollisuusyritysten puunhankinta muuttuvassa yhteiskunnassa. The Timber Procurement of Forest Industry Companies in the Chancing Society. Metsätieteiden tiedotus 371. Helsinki.
- VÄISÄNEN, U. 1967 a. Suunnittelun uudet työkalut. Metsätieteiden katsaus 10/1967. Helsinki.
- 1967 b. Operaatioanalyttinen leimikkosuunnitelma. Metsätaloudellinen aikakauslehti 84 (3). Helsinki.
- WILLIAMS, H. P. 1979. Model Building in Mathematical programming. John Wiley & Sons. New York.
- ZIONTS, S. 1974. Linear and Integer Programming. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs. New Jersey.

Liitekuva: Mallin valinnan menettelytapoesimerkki.



B EMPIIRINEN OSA

PUUTAVARAN KASAUKSEN KEHITTÄMISEN VAIHTOEHDOT	33
SAHAPUUN OPTIMAALISEN KORJUUMENETELMÄN VALINTA	67
PUUNKÄSITTELYASEMAN PERUSTAMISEN KANNATTAVUUS	95

PUUTAVARAN KASAUKSEN KEHITTÄMISEN VAIHTOEHDOT

Development Alternatives in the Bunching of Timber

Esko Mikkonen

Tutkimuksessa tarkastellaan puutavaran kasauksen kehittämisvaihtoehtojen edullisuutta systeemanalyysiin perustuvan viitekehikon pohjalta. Kehittämisvaihtoehtoja arvioidaan utiliteettianalyysin avulla ottamalla huomioon erilaisten yhteismitattomien tekijöiden vaikutus päätöksenteossa.

Kun kaikki asiaan vaikuttavat näkökohdat otettiin huomioon, parhaaksi puutavaran kasauksen toteuttamistavaksi vuonna 1977 muodostui vaihtoehto, jossa ihmistyövaltaisessa hakkuussa käytetään uusia hakkuumenetelmiä, toisin sanoen avohakkuussa suorintahakkuuta ja harvennuksissa 3 m ja 5 m kuitupuun hakkuuta Leka-menetelmällä. Hakkuussa on luovuttu 3 m kuitupuun ihmistekoisesta ajouran varteen kasauksesta. Ihmistyönä kasataan vain 2 m kuitupuuta. Puutavara on edullisinta hakata Leka-menetelmällä ja kasata kuormauksen yhteydessä metsätraktoriin asennetulla pitkäpuomikuormaimella. Ergonomiselta kannalta tämä vaihtoehto on selvästi muita parempi. Korjuukustannukset alenevat noin 6.5 % nykytilannetta kuvaavaan vaihtoehtoon verrattuna, koneinvestointien tasoa voidaan alentaa resurssien oikealla kohdentamisella ja korjuu voidaan hoitaa nykyistä kevyemmällä korjuuorganisaatiolla. Hakkuumiesten työllisyys pysyy kuitenkin suhteellisen korkealla tasolla. Olemassa oleva konekanta työllistetään.

Vuonna 1981 kustannuksiltaan edullisin vaihtoehto on se, jossa koneellistaminen on mahdollisimman pitkällä. Ihmistyövaltaisessa hakkuussa on siirrytty täydellisesti pitkän kuitupuun hakkuuseen uusia hakkuumenetelmiä käyttäen. Kasaus suoritetaan kuormauksen yhteydessä metsätraktorin pitkäpuomikuormaimella.

Mikäli työllistäminen on vuonna 1981 ongelma, paras vaihtoehto on se, jossa koneellistaminen on toteutettu pätehhakkuussa Metsätalon kehittämislaskelmien mukaisesti (koneellistamisaste noin 42 %). Ihmistyövaltaisessa hakkuussa käytetään uusia hakkuumenetelmiä. Varsinaisessa kasauksessa on edullista käyttää erillistä kasaustraktoria sekä metsätraktorin pitkälle ulottuvaa kuormainta.

Vaihtoehto, jossa hakkuu ja siten myös kasaus on runsaasti koneellistettu, on vuonna 1986 paras.

SISÄLLYS

Contents

1 JOHDANTO	5
2 TUTKIMUSMENETELMÄ	5
2.1 Puunkorjuun simulointi	5
2.2 Lineaarinen optimointi	8
2.3 Edullisuusanalyysi	9
2.3.1 Analyysimenetelmän valinta	9
2.3.2 Edullisuusvertailut	11
3 TUTKIMUSTULOKSET	11
3.1 Simuloinnin tulokset	11
3.2 Lineaarisen optimoinnin tulokset	13
3.2.1 Vaihtoehtojen määritys ja rajoitukset	13
3.2.2 Vuosi 1977	13
3.2.3 Vuosi 1981	16
3.2.4 Vuosi 1986	21
3.3 Edullisuusanalyysin tulokset	21
3.3.1 Vuosi 1977	21
3.3.2 Vuodet 1981 ja 1986	23
4 PÄÄTELMÄ	25
KIRJALLISUUTTA - References	26
Summary in English	28
LIITTEET	29

1 JOHDANTO

Puutavaran kasaos on ihmistyövaltaisen hakkuun raskaimpia työvaiheita. Enenevä huomio hakkuutyön ergonomiaa kohtaan, työsuojelu- ja työvoimakysymykset, työn tuottavuuden kohottamispyrkimykset, puustovaurioiden syntymisen estäminen ja vähentäminen, entistä taloudellisempien hakkuumenetelmien kehittäminen, hakkuutyön koneellistaminen, metsätyöntekijöiden asenteet ynnä muut ovat tuntuvasti vauhdittaneet kasauksen kehittämistä kevyempään, rationaalisempaan ja taloudellisempaan suuntaan.

Puutavaran kasausta on viime aikoina tutkittu eri puolilla, mutta kokonaisvaltainen analyysi ja synteesi kasauksen tutkimuksen tuottamasta tiedomäärästä on toistaiseksi puuttanut.

Kuvassa 1 on havainnollistettu eri tekijöiden välisiä vaikutussuuntia ja riippuvuuksia, joita kasauksen koneellistamisen suunnittelussa on pyrittävä ottamaan huomioon.

Tässä tutkimuksessa kasausta tarkastellaan lähinnä yritys- ja kokonaistaloudellisesta näkökulmasta ja arvioidaan, mitä vaikutuksia sen eri toteuttamisvaihtoehdoilla on.

Tutkimuksen tarkoituksena on

- 1 kehittää uusimman kasaustekniikan huomiota ottava puunkorjuun simulointimalli, jolla voidaan tutkia eri kasaustapojen vaikutuksia korjuukustannuksiin, työn tuottavuuteen ja tuotoksiin,
- 2 muodostaa lineaarinen puunkorjuun optimointimalli, jolla simulointimallista saatavien kustannus-, tuotos- ja investointitarvetietojen avulla sekä käytettävissä oleva tai työllistettävä työvoima ja muut resurssit huomioon ottaen voidaan tutkia kokonaiskustannukset minimoivia kasauksen toteuttamisvaihtoehtoja erilaisten rajoitusten vallitessa,
- 3 luoda kustannus-hyötyanalyysin ongelmanlähestymistekniikkaa hyväksikäyttävä päätösmalli, jonka avulla voidaan valita kaikki tarpeelliset näkökohdat huomioon

ottava, kasauksen kehittämisen todennäköisesti haluttavin suunta sekä

- 4 ennustaa ja arvioida työ- ja konekustannusten sekä tuotosten oletetun kehityksen avulla eri kasaustapojen toteuttamiskelpoisuus vuosina 1981 ja 1986.

Tutkimus rajataan koskemaan vain runkopuun korjuumenetelmiä tietynlaisissa tyyppileimikoissa, taulukko 1. Metsätähteiden, kuten hakkuutähteiden ja kantojen, sekä pienpuun korjuu kuten myös hakkeena korjuu jätetään tarkastelujen ulkopuolelle.

Koko korjuumäärän oletetaan tulevan vuoden 1975 PMP-aineiston rakenteen mukaisista tyyppileimikoista.

Toiminnan oletetaan tapahtuvan vain sulan maan aikana ja kaikkien leimikoiden olevan keskimäärin 2. maastoluokkaa ja leimikoiden sijaitsevan 300 m:n metsäkuljetusmatkan päässä. Puuston pituusluokaksi oletetaan 2 sekä männyn ja koivun oksaisuusluokaksi 2 ja kuusen 3.

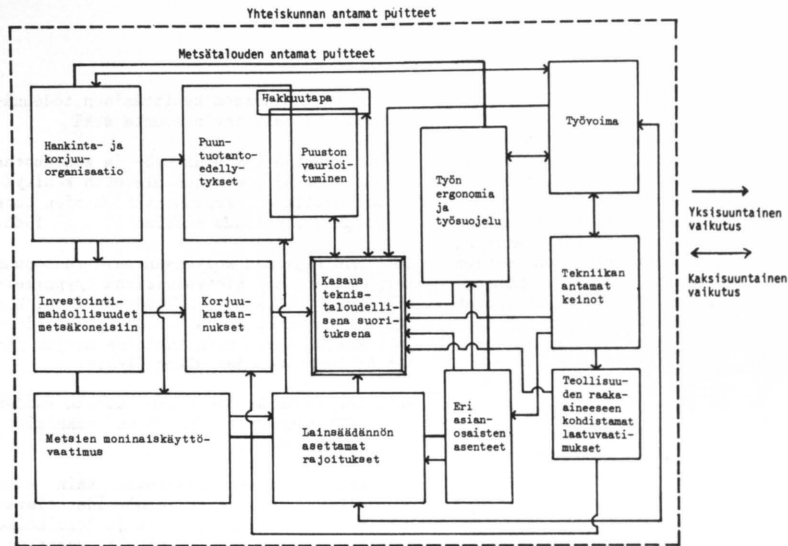
Tutkimuksessa tarkastellaan ainoastaan metsähallituksen ja metsäteollisuusyritysten puunkorjuun puumääriä, jotka olivat vuonna 1977 noin 23.86 milj. m³, ovat vuonna 1981 33.00 milj. m³ ja vuonna 1986 36.40 milj. m³ (kuva 2). Näin ollen noin 20 % valtakunnan kokonaispuumäärästä jää tarkastelujen ulkopuolelle.

2 TUTKIMUSMENETELMÄ

2.1 Puunkorjuun simulointi

Korjuuketjulla tarkoitetaan tässä sitä ihmis- ja konetyöstä koostuvaa toimintokokonaisuutta, jossa puut valmistetaan tietyiksi puutavaralajeiksi ja siirretään kaukokuljetusreitien varteen.

Korjuuketjun koneet ovat kasauskoneita, työkoneita ja metsäkuljetuskoneita. Niiden kustannusten ja tuotosten muutokset on esitetty taulukossa 2. Liitteen 1 (s. 30-32) kuvissa on esitetty ihmistyön ja koneiden tuotosperusteita.



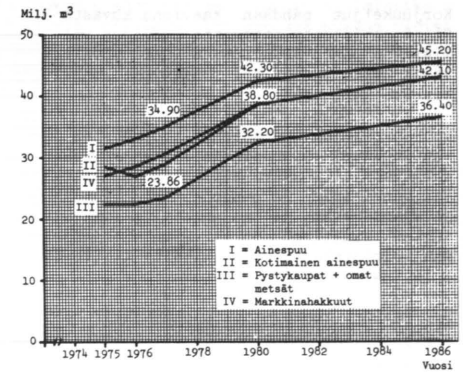
Kuva 1. Kasauksen koneellistamisen systeemi-kaavio

TAULUKKO 1 Tyypileimikkoiden rakenne

Tunnus	Leimikkotyyppi					
	1:iset harvennushakkuut	Mut harvennushakkuut	Väljennushakkuut	Kuituvaltaiset avohakkuut	Keskijäreät avohakkuut	Tukki-valtaiset avohakkuut
Egistettu puuta, m ³ /ha	43	60	80	58	109	136
Tiheys, runkos/ha						
- mänty	514	138	133	372	130	96
- kuusi	555	306	371	363	583	344
- lehtipuut	377	136	184	110	57	25
Rungon keskikoko, m ³						
- mänty	0.030	0.103	0.116	0.069	0.142	0.292
- kuusi	0.030	0.100	0.113	0.064	0.126	0.266
- lehtipuut	0.025	0.083	0.085	0.053	0.093	0.179
Puulajiosuudet, % kuutiomäärästä						
- mänty	39.4	30.1	28.1	49.6	27.6	29.7
- kuusi	38.7	51.0	52.4	40.3	67.5	67.1
- lehtipuut	21.9	18.9	19.5	10.1	4.9	3.2
Puumäärät, milj. m ³						
- vuonna 1977	1.193	3.579	1.909	0.954	5.011	11.214
- vuonna 1981	1.320	3.300	6.930	0.660	4.950	15.840
- vuonna 1986	1.456	4.004	7.280	0.728	5.824	17.108

Tutkimuksessa tarkasteltiin nykyisin käytössä olevia yleisimpiä ihmistyövaltaisia ja koneellisia korjuuketjuja. Joitakin vanhoja käytöstä poistuvia ergonomialtaan mielenkiintoisia korjuuketjuja otettiin tarkasteluun mukaan, kuten myös joitakin uusia, vasta viimeaikaisen kehittelytyön tuloksena syntyneitä, tulevaisuudessa todennäköisesti yleistäviä korjuuketjuja.

Ihmistyövaltaisia korjuuketjuja oli mukana yhteensä 28 ja koneellisia korjuuketjuja 20. Korjuuketjut sekä olosuhteet, joissa kutakin korjuuketjuja voidaan käyttää, on ajouravilin ja leimikkotyyppin mukaan esitetty liitteessä 2 (s. 33).



Kuva 2. Korjattavien puumäärien arvioitu kehitys vuosina 1975-1986

TAULUKKO 2

Koneiden hinnat, tunti- ja siirtokustannukset vuonna 1977 sekä oletetut kustannusten ja tuotosten muutokset

Konetyyppi	Hinta, 1 000 mk	Tunti-kustannukset, mk	Siirto-kustannukset, mk/kerta	Kustannusten nousu, %/vuosi	Tuotosten nousu, %/vuosi
KASAUSKONEET					
Erillisivintturi	53	45	95	12.5	2.0
Maataloustraktori + vintturi	56	70	150	12.5	2.0
Pieni lahusjuontotraktori	150	65	130	12.5	4.0
Esikasustraktori	220	100	220	12.5	4.0
Normetin kasauslaite	240	115	245	12.5	5.0
TYÖKONEET					
Pieni kaato-kasauskone	280	135	334	12.5	5.0
Iso kaato-kasauskone	650	152	315	12.5	5.0
Kaato-juontokone	550	171	460	12.5	4.0
Pieni prosessori	523	135	545	12.5	4.0
Keskisuuri prosessori	700	169	390	12.5	4.0
Iso prosessori	995	225	590	12.5	4.0
Liukupuomiprosessori*)	750	175	390	12.5	4.0
Keskisuuri harvesteri	900	247	390	12.5	5.0
Iso harvesteri	1 380	301	590	12.5	5.0
Pitkäpuomiharvesteri 1**)	800	211	390	12.5	5.0
Pitkäpuomiharvesteri 2***)	1 380	301	590	12.5	5.0
METSÄKÄLJETUSKONEET					
Kuormatraktori	540	97	150	12.5	3.5
Liukupuomikuormatraktori	560	99	155	12.5	3.5
IHMISTYÖ		mk/miestyöpä (sis. sos.kustannukset) 195	-	14.9	1.0

*) Keskisuuri prosessori, jossa pitkälle ulottuva kuormain

***) Liukupuomiprosessori, jossa kouran paikalla kevyt puunkaato-laite = "Ideakone"

****) Vastaa lähinnä järelydeltään ja toimintaperiaatteeltaan Volvo BM 900 -harvesteria

Korjuuketjut nähdään kaaviona kuvasta 3. Siinä on jätetty ottamatta huomioon valmistetun puutavaran pituus ihmistyövaltaisessa hakkuussa ja eri konetyypit koneellisessa hakkuussa.

Korjuuketjujen tuotosten, työpanosten ja kustannusten simulointia varten kullekin korjuuketjulle määritettiin työvaiheittain tai koneittain ja puulajeittain tuotokset ja ajanmenekki ja ne annettiin laskentaa varten funktiomuodossa. Simulointiohjelman toimintakaavio on esitetty liitteessä 3 (s. 34).

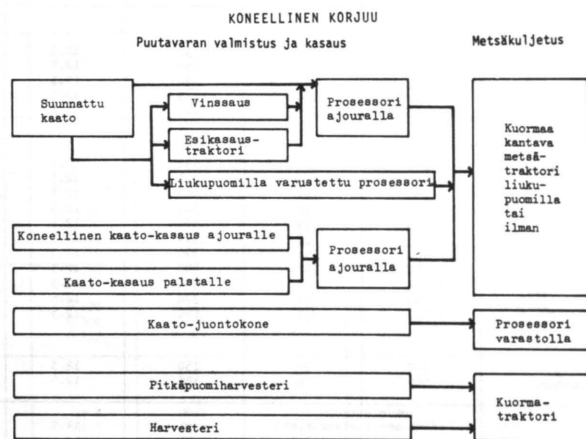
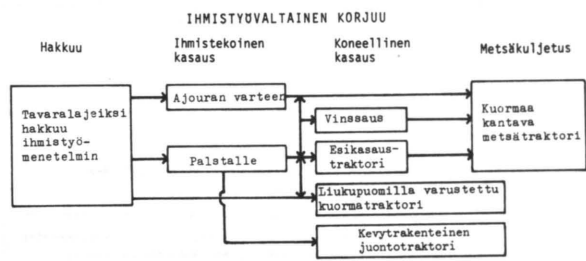
Seuraavien tuotos- tai ajanmenekki-funktioidista poikkeavien olosuhteiden vaikutukset

annettiin kertoimien avulla: hakkuutapa, ajouraväli, maastoluokka, leimikon tiheys, lajittelun vaikutus ja lajitiheyden vaikutus. Leimikkotietoina annettiin runkolukusarja leimikkotyypeittäin, tukki- ja kuitupuosuudet sekä puulajirakenne.

Sekä koneellinen että ihmistyövaltainen korjuu simuloitiin samanlaista menettelyä käyttäen.

2.2 Lineaarinen optimointi

Simulointimalli ei antanut kokonaisuuden kannalta optimaalista korjuuketjujen yhdistelmää, vaan asetti korjuuketjut paremmuus-



Kuva 3. Runkopuun korjuuketjut

järjestykseen eri olosuhteissa. Koska tämän lisäksi haluttiin tutkia erilaisten kasausen rajoitusten vaikutusta kokonaiskustannuksiin minimoiden, päädyttiin oletamaan, että puunkorjuun kustannukset ovat eri tekijöiden lineaarifunktio.

Tässä tapauksessa lineaarinen malli sai muodon

$$C_{\min} = \sum_{j=1}^{315} C_j x_j \quad ; \quad C_j = \text{ketjun } j \text{ yksikkö-}$$

kustannukset

$$x_j = \text{ketjulla } j \text{ kor-}$$

jattava puumäärä

kun rajoituksia ovat

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad ; \quad i = 1 \dots 38 \text{ konetuntirajoitukset}$$

$$i = 39 \dots 44 \text{ leimikkotyypien}$$

$$i = 45 \dots 51 \text{ muut rajoitukset}$$

puumäärärajoitukset

Konetuntirajoituksella määritetään asianomaisen koneen työtuntimäärä pienemmäksi, yhtäsuureksi tai suuremmaksi kuin haluttu tuntimäärä. Leimikkotyypien puumäärärajoitukset ovat yhtäsuuri-kuin-tyyppiä olevia pakotteita. Muut rajoitukset ovat pienempi-kuin-tyyppiä.

Rajoituksina eri vaihtoehdoissa voitiin käyttää

tarvittavien investointien kokonaismäärää, käytettävissä olevaa kokonaistyöpanosta, ajouraväliä harvennushakkuissa, ihmistekoista kasaus ajouran varteer, kasattavan kuitupuun pituutta, koneiden käyttöä harvennushakkuussa, korjuuketjuissa olevien koneiden työtuntimääriä ja hakkuussa käytettävissä olevaa ihmistyöpanosta.

Lineaarisen optimoinnin lähtötietoina käytettiin simulointimallin antamia korjuuketjukohtaisia investointi-, kustannus- ja työpanostietoja sekä koneittaisia tuotostietoja, jotka kaikki oli laskettu kuutioryksikköä kohti eri olosuhteissa. Lineaarisen optimoinnin minimointitehtävä muotoiltiin siten, että se voitiin ratkaista olemassa olevia LP-kirjasto-ohjelmistoja käyttäen. Käytetyt ohjelmistot olivat CDC:n APEX III ja Oy Nokia Ab:n LP 600. Tulos-

tuksena käytetty malli antaa optimiratkaisussa eri leimikkotyypeissä mukana olevat korjuuketjut sekä niillä korjattavat puumäärät ja ratkaisun tarvitsemat resurssit.

Edullisuusanalyyseissä ja jatkotarkastelemissa näitä lineaarimallin avulla luotuja korjuuketjuyhdistelmiä tiettyjen rajoitusten ollessa voimassa nimitetään vaihtoehdoiksi.

2.3 Edullisuusanalyysi

2.3.1 Analyysimenetelmän valinta

Kun vertaillaan erilaisten puunkorjuumenetelmien käyttökelpoisuutta ja valitaan toteutettavia korjuumenetelmiä, päätöksenteossa on otettava huomioon muutkin kuin rahana mitattavat seikat. Systemaattinen analyysi antaa lähtökohdan tällaiseen useita erilaisia yhteismitattomia tekijöitä sisältävien kokonaisuuksien vertailemiseksi keskenään. Muita edullisuusanalyysimenetelmiä ovat

kustannus-hyötyanalyysi,
kustannus-vaikuttavuusanalyysi,
utiliteettianalyysi,
liiketaloudelliset laskelmat ja arvoanalyysi.

Perinteistä kustannus-hyötyanalyysiä ei voida tässä tapauksessa soveltaa, sillä kasausen toteuttamisen vaihtoehdot eivät ole luonteeltaan sellaisia, että niiden toteuttamisesta aiheutuisi tiettyinä vuosina tietyt suoraan laskettavissa olevat hyödyt ja kustannukset. Vaihtoehtojen toteuttamisesta aiheutuu kunakin vuonna vain juoksevia kustannuksia, joten tarkastelut on suoritettava asianomaisina vuosina. Vertailut eri vaihtoehtojen kesken ovatkin yhtä paikkansapitäviä, tarkasteltiinpa niitä mitä tahansa perinteistä laskentamenetelmää käyttäen tai minkä tahansa vuoden tasolla, koska vaihtoehdot ovat luonteeltaan ei-projektimaisia. Tästä syystä esimerkiksi kustannus-hyötysuhteen määrittäminen ja sen käyttäminen edullisuuskriteerinä on vailla perustaa.

Tässä tutkimuksessa edullisuusanalyysimenetelmäksi valittiin utiliteettianalyysi, joka on kehitetty kustannus-hyötyanalyysistä ja jossa eri tekijöiden vaikutukset vaihtoehtojen vertailussa muutetaan operaationaaliseksi piste- ja painotusjärjestelmän avulla.

Vaihtoehtojen paremmuuden arvioinnissa käytetään menetettyä, jossa kussakin vaihtoehdossa osatekijöiden (= alataivoitteet, vrt. kuvaan 4) paremmuusjärjestysluvut kerrotaan painoarvolla ja summataan seuraavan kaavan avulla.

$$\text{Kriteeri} \quad \min^K = \sum_{i=1}^n \alpha_i a_i; \quad \sum_{i=1}^n a_i = 100$$

α_i = vaihtoehdon järjestysluku osatekijän suhteen
 a_i = osatekijän painoarvo
 n = osatekijöiden lukumäärä

Kriteerin pienin arvo osoittaa parhaan vaihtoehdon.

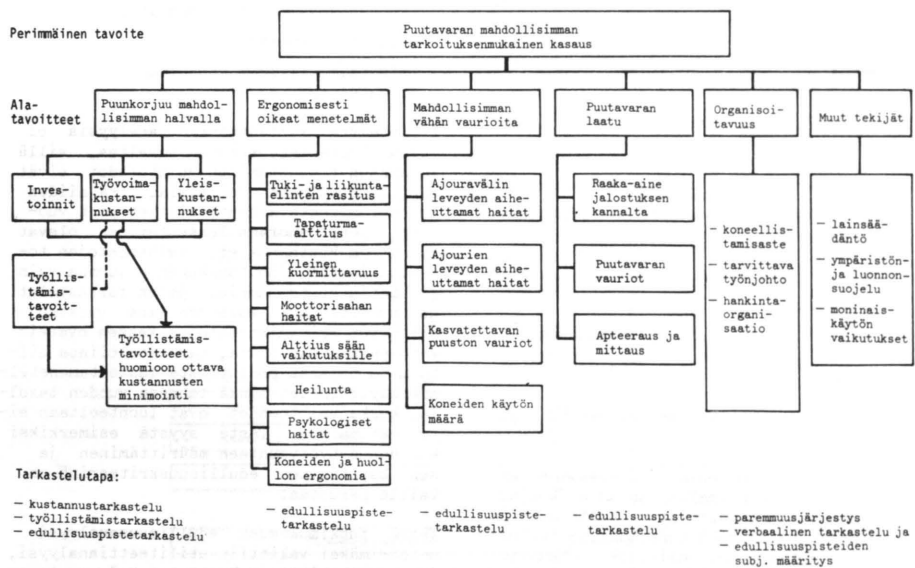
Tähän menettelytapaa liittyvät heikkoudet pyrittiin poistamaan sillä, että kaikki osatekijät ja niiden komponentit mitataan järjestysasteikolla.

Lopulliseen vertailuun tässä tapauksessa valittiin osatekijöiksi

puunkorjuun kustannukset,
 työvoima,
 ergonomia,
 kasvatettavalle puustolle harvennuksessa aiheutuvat vauriot,
 puutavaran laatu,
 toiminnan organisointi ja
 muut vaikutukset.

Kustannukset ja työvoima yhdistettiin yhdeksi indikaattoriksi, jonka vaikutusta tarkasteltiin eri kulumista.

Relevanssipuun (kuva 4) alataivoitteina on esitetty lopullisessa tarkastelussa huomioon otetut osatekijät, jotka ovat itse asiassa keinoja tämän tutkimuksen perimmäisen tavoitteen saavuttamiseksi.



Kuva 4. Tavoite-keinohierarkia (relevanssipuun) kasauksen edullisuustarkasteluissa

Erialaisten osatekijöiden objektiivinen mitaaminen on vaikea ongelma. Kustannukset, työvoiman tarve ja konetuntitarve voitiin mitata objektiivisesti ja varsin luotettavasti suhdelukuasteikolla markkoina ja tunteina.

Vaihtoehtojen ergonomista arvoa ei voida mitata objektiivisesti suhdelukuasteikolla, kun on kysymys näin laajasta, useita erilaisia tekijöitä sisältävästä tarkastelusta. Tässä on tyydyttävä järjestysasteikolla tapahtuvaan mittaukseen.

Kasvatettavalle puustolle aiheutuvien vaurioiden, puutavaran laadun, töiden organisoitavuuden ja muiden tekijöiden vaikutusten mittaamisessa ja arvioinnissa on myös tyydyttävä järjestysasteikon käyttöön, sillä objektiivista suhdelukuasteikolla operoivaa mittaria ei ole.

Koska korkeampi mitta-asteikko sisältää aina alemman mitta-asteikon mittauskyvyn, kaikki vertailut voidaan tehdä samalla mitta-asteikolla, kun asteikoksi valitaan järjestysasteikko.

2.3.2 Edullisuusvertailut

Eri vaihtoehdot asetettiin paremmuusjärjestykseen toisaalta kustannus-, toisaalta niiden työllistävän vaikutuksen mukaan. Vuosien 1977 ja 1981 tasoilla tarkasteltiin molempia, vuoden 1986 tasolla vain kustannuksia. Menettelytapa eri vaihtoehtojen paremmuuden selvittämiseksi oli seuraava.

Vaikutukset osatekijöiden suhteen olivat kustannusperustaisessa tarkastelussa kokonaiskustannukset, vuotuiset investointikustannukset, työvoimakustannukset ja käyttökustannukset. Kunkin paremmuusjärjestys määritettiin. Kullekin näistä annettiin erilaisia tarkastelukulman (ks. liitettä 4, s. 35) mukaan vaihtelevia painoarvoja, joilla järjestyspisteet kerrottiin. Saadut osapisteket laskettiin yhteen ja lopulliset pistemäärät antoivat vaihtoehtojen keskinäisen järjestyksen tämän osatekijän suhteen.

Työllistämistarkastelussa jaottelu oli sama kuin kustannustarkastelussa, mutta työvoimakustannuksia tarkasteltiin päänvälistä näkökulmasta. Toisin sanoen vaihtoehtojen työllistävä vaikutus oli yhtenä paremmuus-kriteerinä siten, että eniten

työllistävää vaihtoehto oli paras ja niin edespäin. Myös tässä annettiin osatekijän eri komponenteille vaihtelevia painoarvoja, joiden mukaan paremmuusjärjestys määräytyi.

Myös muiden osatekijöiden, ergonomisten tekijöiden, kasvatettavalle puustolle aiheutettujen vaurioiden, puutavaran laadun, toiminnan organisoitavuuden ja muiden, osalta määritettiin vaihtoehtojen paremmuusjärjestys vastaavanlaista menettelyä käyttäen.

Koska vaihtoehtojen keskinäinen paremmuus riippuu ratkaisevasti osatekijöiden painotuksesta, vaihtoehtojen edullisuuden herkkyyttä tulkittiin erilaisten painotustapojen avulla. Käytetyt painotustavat on esitetty liitteessä 4 (s. 35).

Eri osatekijöiden arvioinnissa voidaan painoarvot kullekin osatekijän komponentille määrittää suhteellisen objektiivisesti eikä komponenttien painotuksen vaihtelu vaikuta ratkaisevasti muihin kuin kustannuksiin ja työllistämiseen, joita tarkasteltiinkin usealla eri tavalla.

Sen sijaan painoarvojen antaminen eri osatekijöille vaihtoehtojen lopullisen paremmuuden määrittämistä varten on todellisten päätöksentekijäin tehtävä; analyysin laatija voi vain esittää erilaisia vaihtoehtoisia painolukuja ja tätä en osittain, mihin ne johtavat. Tutkimuksessa käytetyt painoarvot on ymmärrettävä tästä lähtökohdasta käsin, mutta siitäkin huolimatta niiden valinta perustuu vain analysoijan käsityksiin eri osatekijöiden tärkeydestä.

Eri osatekijöiden painotus on todellisudessa saatavissa selville vain tutkimalla todellisten päätöksentekijäin arvostukset ja voimasuhteet kussakin päätöstilanteessa.

3 TUTKIMUSTULOKSET

3.1 Simuloinnin tulokset

Simulointimalli tulosti kaikkien korjuuketjujen kokonaisajanmenekin, ihmistyön ajanmenekin ja yksikkökustannukset paremmuusjärjestyksessä eri olosuhteissa. Tulostuksena saatiin paitsi koko korjuuketjusta myös korjuuketjun eri koneista vastaavat tiedot.

Taulukossa 3 on esitetty eräiden parhaiden korjuuketjujen suhteellisia lukuja eri leimikkotyypeissä verrattuna 3 m kuitupuun ajouran varteen hakkuuseen kokonaisajan-

menekin, ihmistyön ajanmenekin ja yksikkökustannusten osalta vuonna 1977 käytössä 25...35 m:n ajouraväliä harvennushakkuissa.

TAULUKKO 3 Eräiden korjuuketjujen simuloinnilla laskettu suhteellinen kokonaisajamenekki ja ihmistyön ajanmenekki sekä suhteelliset yksikkökustannukset verrattuna 3 m kuitupuun hakkuuseen ajouran varteen. Vuosi 1977. Leimikon koko 500 m². Ajouraväli 25...35 m

Korjuuketju	Kokonaisajamenekki						Ihmistyön ajanmenekki						Yksikkökustannukset					
	Leimikkotyyppi																	
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
%																		
IHMISTYÖVALTAISET																		
TVLM ^{*)} , noin 3 m, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	← 100 →																	
TVLM, noin 5 m, hakkuu levälleen + Normetin kasaussäiliö + kuormatraktori	75	78	78	76	80	84	75	78	78	77	81	85	85	89	91	88	94	98
TVLM, noin 3 m, hakkuu levälleen + Normetin kasaussäiliö + kuormatraktori	77	79	80	78	82	85	77	80	81	79	83	86	88	92	94	92	97	100
TVLM, noin 5 m, Leka-menetelmä + esikasastraktori + kuormatraktori	78	81	82	-	-	-	77	79	80	-	-	-	83	86	89	-	-	-
TVLM, noin 3 m, Leka-menetelmä + esikasastraktori + kuormatraktori	80	82	83	-	-	-	79	81	82	-	-	-	86	89	92	-	-	-
TVLM, noin 5 m, Leka-menetelmä + Normetin kasaussäiliö + kuormatraktori	80	83	84	-	-	-	80	83	84	-	-	-	89	93	96	-	-	-
KONEELLISET																		
Pieni kaato-kasauskone + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	47	44	42	40	32	29	58	54	51	50	39	35	146	137	130	137	104	88
Pieni kaato-kasauskone + iso prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	49	45	42	41	32	29	60	55	52	51	39	34	171	160	150	158	117	96
Esikasastraktori + keskisuuri prosessori + kuormatraktori	51	48	46	46	40	45	55	52	51	50	44	48	110	106	102	107	90	87
Esikasastraktori + iso prosessori + kuormatraktori	52	49	47	46	41	45	57	53	51	51	44	48	134	128	122	128	103	95
Normetin kasaussäiliö + keskisuuri prosessori + kuormatraktori	52	49	48	46	41	46	58	55	53	52	46	50	114	110	107	110	93	91
Vintturilla varustettu matalous- traktori + iso prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	61	58	57	54	51	59	72	70	69	65	62	71	120	117	114	117	101	-
Liukupuomipsrosessori + kuormatraktori	54	50	48	48	39	42	61	57	54	54	44	45	128	121	114	121	93	82
Erillisvintturi + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	78	77	77	-	-	-	98	96	97	-	-	-	128	125	123	-	-	-
Kaato-juontokone + iso prosessori varastolla	-	-	-	53	34	27	-	-	-	66	43	33	-	-	-	243	162	-
Kaato-juontokone + pieni prosessori varastolla	-	-	-	56	36	28	-	-	-	71	45	34	-	-	-	227	150	-
Iso kaato-kasauskone, hakkuu palstalle kasoihin + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	-	-	-	41	31	29	-	-	-	51	39	35	-	-	-	148	109	92
Normetin kasaussäiliö + iso prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	53	50	48	47	71	46	59	56	54	52	46	50	139	133	127	131	107	-

*) TVLM = Tavaralajimenetelmä

Leimikkotyypit: 1 = Ensimmäiset harvennushakkuut 4 = Kuituvaltaiset avohakkuut
2 = Muut -"- 5 = Keskijäreit -"-
3 = Väljennyshakkuut 6 = Tukkiavaltaiset -"-

3.2 Lineaarisen optimoinnin tulokset

3.2.1 Vaihtoehtojen määritys ja rajoitukset

Kun lopulliseen tarkasteluun mukaan tulevia vaihtoehtoja kehiteltiin lineaarisen optimoinnin keinoin, menettelytapa oli seuraava.

O-vaihtoehdot laskettiin käsin simulointitietojen perusteella asianomaisina vuosina kyseeseen tulleilla korjuuketjuilla. Puutavaran pituusjakamat (taulukko 4) saatiin selvityksistä sekä ekstrapoloimalla kehitystrendiä vuoteen 1986 saakka.

Optimoinnin ensimmäisessä tietokoneajossa ei toiminnalle yleensä asetettu mitään rajoituksia, jotta saataisiin käypä kantaratkaisu, joka minimoisi kustannukset ja josta voitaisiin edelleen kehitellä muita toimintavaihtoehtoja. Kantaratkaisu on eri tarkasteluvuosina ilmoitettu nimellä vaihtoehto A. Rajoitukset on esitetty tarkemmin kunkin vaihtoehdon kuvauksessa.

Toisessa vaiheessa asetettiin työllistäminen lisärajoitukseksi sekä koneille että miehille. Työllistäminen oli alussa pakotteena, lopussa nimenomaan työvoimapula oli toimintaa rajoittava tekijä.

Kolmannessa vaiheessa lisärajoitukseksi asetettiin investointien niukkuus (vain vuosina 1981 ja 1986).

Neljännässä vaiheessa pitkän kuitupuun ihmistekoinen kasaussäiliö varteen otettiin lisärajoitukseksi. Tämä rajoitus ei missään ratkaisussa minään tarkasteluvuonna muodostunut tehokkaaksi ja sen vaikutus ei näy missään lopullisessa vaihtoehdossa.

Viidennässä vaiheessa asetettiin uudeksi lisärajoitukseksi kuitupuun ihmistekoinen kasaussäiliö varteen siten, että sellaisia korjuumenetelmiä ei käytetty, joissa sitä esiintyi.

Kuudennessa vaiheessa rajoitukseksi otettiin kepean, 15...25 m:n ajouravälin käyttö harvennushakkuissa.

Seitsemännässä vaiheessa rajoituksena otettiin mukaan muiden korjuukoneiden paitsi kuormatraktorin käyttökielto harvennushakkuissa.

TAULUKKO 4 Puutavaran pituusjakamat

Vuosi	Puutavaran pituus			Yhteensä
	2 m ja n. 2 m	3 m ja n. 3 m	3...6 m	
	suhteellinen osuus, %			
1977	56	34	10	100
1981	26	39	35	100
1986	20	40	40	100

Lopullisia jatkotarkasteluihin mukaan otettavia vaihtoehtoja muotoillessa jouduttiin vielä asettamaan eri vuosina erilaisia konerajoituksia. Niissä tapauksissa katsottiin tietyn korjuutekniikan olevan joko mahdotonta vielä siinä kehitysvaiheessa yleisesti saavuttaa tai sen olevan "liian vanhanaikaista" enää optimoinnin ilmoittamassa mitassa.

Työvoima- ja investointirajoituksia jouduttiin vaihtoehtojen kehittelyn aikana useaan otteeseen muuttamaan ja kokeilemaan, sillä optimoinnin tuloksena ei useinkaan syntynyt käyviä ratkaisuja.

Vuosien 1977, 1981 ja 1986 eri vaihtoehdot eivät vastaa toisiaan, toisin sanoen esimerkiksi vaihtoehto B on vuonna 1977 erilainen kuin vuosina 1981 ja 1986.

3.2.2 Vuosi 1977

Korjuuta ja sen yhteydessä suoritettavaa kasausta tutkittaessa saatiin seitsemän vaihtoehtoa. Rajoitusarvot taulukossa 5 on merkitty tähdellä.

Vaihtoehto O. Vertailuvaihtoehto. Toimitaan kuten tähänkin asti. Nykyisiä korjuumenetelmiä käytetään tämänhetkisessä laajuudessa. Tämä merkitsee 2 m ja 3 m kuitupuun hakkuuta ajouran varteen sekä jossakin määrin pitkän kuitupuun suorintahakkuuta. Työllistetään olemassa olevat koneet (ei optimaalinen ratkaisu).

Vaihtoehto A. Mitään toimintaa rajoittavia tekijöitä ei ole, vaan tehtävänä on valita kokonaiskustannukset minimoivat korjuuketjut eri leimikkotyypeissä ja niillä korjattavat puumäärät.

TAULUKKO 5 Eri vaihtoehdoissa käytettävät resurssit. Vuosi 1977. Korjattu puumäärä 23.86 milj. m³
 Table Resources used in the different alternatives. Year 1977. Quantity of timber harvested 23.86 million m³(s)

Resurssit - Resources	Vaihtoehto - Alternative						
	O	A	B	C	D	E	F
Ihmistyöpanos, milj. h Human labour input, million hours							
- hakkuussa - in cutting	11.27	6.41	10.00 ^{*)}	8.78	10.00 ^{*)}	10.00 ^{*)}	8.99
- konetyössä - in mechanised work	3.61	3.22	3.39	3.59	3.45	3.86	4.40
Yhteensä - Total	14.88	9.63	13.39	12.37	13.45	13.86	13.39
Konetyöpanos, 1 000 h Mechanised work input, 1,000 hours							
- iso kaato-kasaukone large feller-buncher	-	-	10.0 ^{*)}	10.0 ^{*)}	10.0 ^{*)}	10.0 ^{*)}	10.0 ^{*)}
- keskiuuri prosessori medium-sized processor	80.0 ^{*)}	605.6	80.0 ^{*)}	80.0 ^{*)}	80.0 ^{*)}	80.0 ^{*)}	80.0 ^{*)}
- iso prosessori large processor	86.0 ^{*)}	-	86.0 ^{*)}	86.0 ^{*)}	86.0 ^{*)}	86.0 ^{*)}	86.0 ^{*)}
- keskiuuri harvesteri medium-sized harvester	27.0 ^{*)}	-	27.0 ^{*)}	27.0 ^{*)}	27.0 ^{*)}	27.0 ^{*)}	27.0 ^{*)}
- pitkäpuomiharvesteri 2 long-boom harvester	-	-	3.2 ^{*)}	3.2 ^{*)}	3.2 ^{*)}	3.2 ^{*)}	3.2 ^{*)}
- esikasastraktori bunching tractor	-	-	-	-	60.3	157.1	39.0
- vintturilla varustettu maataloustraktori farm tractor equipped with winch	-	-	-	128.6	-	229.7	642.0
- kaato-juontokone feller-skidder	-	-	25.1 ^{*)}	25.1 ^{*)}	25.1 ^{*)}	25.1 ^{*)}	25.1 ^{*)}
- pieni prosessori varastolla small processor at the landing	-	-	20.0 ^{*)}	20.0 ^{*)}	20.0 ^{*)}	20.0 ^{*)}	20.0 ^{*)}
- kuormatraktori forwarder	2 805.0	1 198.5	1 560.0	1 560.0	1 560.0	1 560.0	1 560.0
- liukupuomikuormatraktori forwarder equipped with far-reaching loader	-	828.2	1 000.0	1 000.0	1 000.0	1 000.0	1 000.0
Kokonais- investoinnit, Mmk Total investments, mk/m ³ marks/m ³ (s)	175.08	144.30	163.69	161.79	168.13	172.47	167.18
Korjuun kokonaiskustannukset, Mmk Total costs of harvesting, million marks	846.38	661.43	791.52	761.53	801.91	838.28	819.94
Korjuun yksikkökustannukset, mk/m ³ Unit costs of harvesting, marks/m ³ (s)	35,47	27,72	33,17	31,92	33,61	35,13	34,36
Korjuun yksikkötyöpanos, h/m ³ Unit labour input in harvesting, hours/m ³ (s)	0.62	0.40	0.56	0.52	0.56	0.58	0.56

*) Ennalta asetettu muuttujan rajoitusarvo
Pre-determined constraint value of the variable

TAULUKKO 6

Eri korjuuketjuilla leimikkotyypeittäin korjattavien puumäärien suhteelliset osuudet.
 Vuosi 1977. Kokonaispuumäärä 23.86 milj. m³. (Vahvistetut luvut 30 min ajouravälillä)

Vaihtoehto	Leimikkotyyppi	Korjuuketju											Kuu- tio- mä- rät, 1 000 m ³									
		noin 5 m, hakkuu levälleen + liukupuomikuormatraktori	noin 5 m, suorinta + kuormatraktori	noin 3 m, Leka-menetelmä + liukupuomikuormatraktori	noin 5 m, Leka-menetelmä + liukupuomikuormatraktori	2 m, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	noin 3 m, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	2 m, hakkuu palstalle kasoihin + liukupuomikuormatraktori	2 m, hakkuu palstalle kasoihin + esikasastraktori + kuormatraktori	2 m, hakkuu palstalle kasoihin + vintturilla varustettu maatalous- traktori + kuormatraktori	noin 3 m, hakkuu palstalle kasoihin + esikasastraktori + kuormatraktori	noin 3 m, hakkuu palstalle kasoihin + vintturilla varustettu maatalous- traktori + kuormatraktori		1 m, hakkuu palstalle kasoihin + liukupuomikuormatraktori	5 m, hakkuu palstalle kasoihin + esikasastraktori + kuormatraktori	suunnattu kaato + keskiuuri prosessori + kuormatraktori	suunnattu kaato + iso prosessori + kuormatraktori	pieni kaato-kasaukone + keskiuuri prosessori + kuormatraktori	kaato-juontokone + pieni prosessori	keskiuuri harvesteri + kuormatraktori	pitkäpuomiharvesteri 2 + kuormatraktori	
O	1: set harvennushakkuut Muut -" Väljennushakkuut Kuituvalt. avohakkuut Keskijäret -" Tukkivalt. -"		8																			1 193 3 579 1 909 954 5 011 11 214
A	1: set harvennushakkuut Muut -" Väljennushakkuut Kuituvalt. avohakkuut Keskijäret -" Tukkivalt. -"	100 100 100	100												100							1 193 3 579 1 909 954 5 011 11 214
B	1: set harvennushakkuut Muut -" Väljennushakkuut Kuituvalt. avohakkuut Keskijäret -" Tukkivalt. -"			100 100			73	27 78 56 45		44												1 193 3 579 1 909 954 5 011 11 214
C	1: set harvennushakkuut Muut -" Väljennushakkuut Kuituvalt. avohakkuut Keskijäret -" Tukkivalt. -"									51				49 30 100 89								1 193 3 579 1 909 954 5 011 11 214
D	1: set harvennushakkuut Muut -" Väljennushakkuut Kuituvalt. avohakkuut Keskijäret -" Tukkivalt. -"								14		85 100	61 15										1 193 3 579 1 909 954 5 011 11 214
E	1: set harvennushakkuut Muut -" Väljennushakkuut Kuituvalt. avohakkuut Keskijäret -" Tukkivalt. -"											16	3	81 100								1 193 3 579 1 909 954 5 011 11 214
F	1: set harvennushakkuut Muut -" Väljennushakkuut Kuituvalt. avohakkuut Keskijäret -" Tukkivalt. -"													100 100 46	89 100 14	54						1 193 3 579 1 909 954 5 011 11 214

Vaihtoehto B. Puutavaran valmistuksessa on työllistettävä hakkuumiehiä 10 milj. tuntia vuodessa sekä olemassa olevat puunkorjuukoneet. Korjuun kokonaiskustannukset on minimoitava.

Vaihtoehto C. Olemassa olevat koneet on työllistettävä. Puutavaraa ei kasata ihmistyönä ajouran varteen.

Vaihtoehto D. Muuten sama kuin vaihtoehto C, mutta hakkuumiehiä on työllistettävä 10 milj. tuntia vuodessa.

Vaihtoehto E. Koneet on työllistettävä sekä hakkuumiehiä 10 milj. tuntia vuodessa. Ihmistekoista kasausta ajouran varteen ei käytetä kuten ei myöskään kapeaa, 15...25 m:n ajouraväliä.

Vaihtoehto F. Koneet on työllistettävä, ajouran varteen kasausta ei käytetä eikä kapeaa, 15...25 m:n ajouraväliä.

Missään toimintavaihtoehdossa ei oletettu investointien tai ihmistyövoiman muodostuvan toimintaa rajoittavaksi tekijäksi.

Kustannuksiltaan edullisimmaksi vaihtoehdoksi lineaarisen optimoinnin perusteella muodostui vaihtoehto A, jonka mukaan tukki- valtaiset avohakkuut koneellistettaisiin 100-%:sti prosessoriin perustuvilla korjuuketjuilla, keskijäreissä avohakkuissa käytettäisiin 100-%:sti suorintahakkuuta ja muissa leimikkotyypeissä hakattaisiin noin 5 m kuitupuuta levälleen ja kasausta tapahtuisi kuormauksen yhteydessä pitkäpuomikuormaimella varustetulla metsätraktorilla (ks. taulukkoa 6, s. 15).

3.2.3 Vuosi 1981

Erilaisia rajoituksia harkittaessa oletettiin vuonna 1981 toimittavan siten, kuin Metsätehon uusin korjuun taloudellista kehittämistä koskeva laskelma osoittaa. Niinpä eräissä vaihtoehdoissa mukaan tulevat konemäärärajoitukset ovat laskelman mukaisia. Rajoitusarvot on taulukossa 7 (s. 17) merkitty tähdellä. Vaihtoehdot muodostuivat seuraaviksi.

Vaihtoehto O. Oletetaan nykyisten korjuumenetelmien olevan edelleen käytössä vuonna 1981 siten, että näillä menetelmillä hakatun puutavaran pituusjakauma valtakunnan puunkorjuussa oletetaan taulukon 4 (s. 13) mukaiseksi. Oletetaan myös työllistettävän korjuun kehittämisselkkelmassa

esitetty konekalusto (ei optimaalinen ratkaisu).

Vaihtoehto A. Mitään nykyistä suurempia rajoituksia ei ole, vaan ihmistyö sallitaan kaikissa muodoissaan. Kone- tai muita resurssirajoituksia ei esiinny. Edelleenkin oletetaan, että tämän laskelman perusteissa esitetyt koneet on markkinoilla riittävästi saatavilla.

Vaihtoehto B. Ihmistyö sallitaan kuten vaihtoehdossa A eikä muita resurssirajoituksia ole. Pitkäpuomiharvesterin 1 oletetaan kuitenkin olevan siinä määrin kehittämätön, ettei puunkorjuuta sen avulla voida käytännön mitassa toteuttaa. Tämän koneen käyttöön perustuvat korjuuketjut onkin korjuuketjuvalinnoista rajattu pois.

Vaihtoehto C. Tässä vaihtoehdossa oletetaan työllistettävän uusimman puunkorjuun kehittämisselkkelman mukainen korjuukonekalusto. Konevalintoja rajataan kuitenkin siten, että pitkäpuomiharvesteria 1 oletetaan voitavan käyttää vain 20 000 tuntia vuodessa.

Vaihtoehto D. Tämä vaihtoehto on muutoin sama kuin vaihtoehto A, mutta koneisiin käytettävissä olevien investointivarojen suuruus rajoitetaan 250 milj. markkaan vuodessa.

Vaihtoehto E. Tämä vaihtoehto on muutoin sama kuin vaihtoehto C, mutta investointirajoitukseksi asetetaan 280 milj. markkaa vuodessa, eikä pitkän kuitupuun ihmistekoista kasausta sallita.

Vaihtoehto F. Tämä vaihtoehto on muutoin sama kuin vaihtoehto E, mutta kapean, 15...25 m:n ajouravälin käyttöä harvennushakkuissa ei sallita.

Vaihtoehto G. Kehittämisselkkelman mukainen konekalusto on työllistettävä, lisäksi on työllistettävä hakkuumiehiä 10 milj. tuntia vuodessa, investointirajoituksena on 300 milj. markkaa vuodessa, kapeampaa, 15...25 m:n ajouraväliä ei saa käyttää eikä harvennushakkuissa muita koneita paitsi kuormatraktoria.

Optimoinnin perusteella edullisin on vaihtoehto A, jossa tukki- ja keskijäreät avohakkuuleimikot korjataan pitkäpuomiharvesterilla, kuituvaltaiset avohakkuuleimikot suorinta käyttäen ja harvennussissa hakataan pitkä kuitupuun levälleen pitkäpuomikuormatraktorilla kuljetettavaksi (ks. taulukkoa 8, s. 18).

TAULUKKO 7
Table

Eri vaihtoehdoissa käytettävät resurssit. Vuosi 1981. Korjattava puumäärä 33.00 milj. m³
Resources used in the different alternatives. Year 1981. Quantity of timber to be harvested 33.00 million m³(s)

Resurssit - Resources	Vaihtoehto - Alternative							
	O	A	B	C	D	E	F	G
Ihmistyöpanos, milj. h Human labour input, million hours								
- hakkuussa - in cutting	10.58	4.76	6.71	7.17	11.27	8.16	7.31	10.00 [*]
- konetyössä - in mechanised work	4.21	4.32	4.17	3.88	3.15	3.66	3.88	3.93
Yhteensä - Total	14.79	9.08	10.88	11.05	14.42	11.82	11.19	13.93
Konetyöpanos, 1 000 h Mechanised work input, 1,000 hours								
- pieni kaato-kasaukone small feller-buncher	-	-	506.9	185.0	-	-	185.0	-
- iso kaato-kasaukone large feller-buncher	8.0 [*]	-	-	8.0 [*]	-	8.0 [*]	8.0 [*]	8.0 [*]
- keskiuuri prosessori medium-sized processor	200.0 [*]	-	506.9	200.0 [*]	-	200.0 [*]	200.0 [*]	200.0 [*]
- iso prosessori large processor	205.0 [*]	-	-	205.0 [*]	-	205.0 [*]	205.0 [*]	205.0 [*]
- pitkäpuomiharvesteri 1 long-boom harvester	-	1 028.6	0.0 [*]	20.0 [*]	-	-	20.0 [*]	-
- pitkäpuomiharvesteri 2 long-boom harvester	117.0 [*]	-	-	117.0 [*]	-	117.0 [*]	117.0 [*]	117.0 [*]
- esikasustraktori bunching tractor	-	-	-	-	67.6	109.2	404.6	193.9
- kuormatraktori forwarder	2 908.6	1 330.6	1 315.1	1 359.5	1 687.4	1 596.3	2 078.6	2 524.1
- liukupuomikuormatraktori forwarder equipped with far-reaching loader	-	1 064.3	1 064.3	1 064.3	881.4	772.9	-	-
Kokonaisinvestoinnit, Total investments, Mmk million marks mk/m ³ marks/m ³ (s)	323.56	306.51	278.44	287.56	250.00 [*]	280.00 [*]	280.00 [*]	300.00 [*]
Korjuun kokonaiskustannukset, Mmk Total costs of harvesting, million marks	1 506.78	1 232.90	1 270.02	1 280.27	1 303.22	1 294.80	1 314.01	1 447.12
Korjuun yksikkökustannukset, mk/m ³ Unit costs of harvesting, marks/m ³ (s)	45,66	37,36	38,49	38,80	39,50	39,24	39,81	43,85
Korjuun yksikkötyöpanos, h/m ³ Unit labour input in harvesting, hours/m ³ (s)	0.45	0.28	0.33	0.34	0.44	0.36	0.34	0.40

^{*} Ennalta asetettu muuttujan rajoitusarvo
Pre-determined constraint value of the variable

TAULUKKO 8

Eri korjuuketjuilla leimikkotyypeittäin korjattavien puumäärien suhteelliset osuudet. Vuosi 1981. Kokonaispuumäärä 33.00 milj. m³ (Vahvistetut luvut 30 min ajouraväliltä)

Vaihtoehto	Leimikkotyyppi	Korjuuketju										Kuutio- määrät, 1 000 m ³	
		2 m, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	noin 3 m, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori	noin 5 m, suorinta + kuormatraktori	noin 5 m, hakkuu levälleen + liukupuomikuormatraktori	noin 5 m, leika-menete,lmä + esikasustraktori + kuormatraktori	suunnattu kaato + keskisuuri prosessori + kuormatraktori	suunnattu kaato + iso prosessori + kuormatraktori	pieni kaato-kasauskone + keskisuuri prosessori + kuormatraktori	iso kaato-kasauskone + keskisuuri prosessori + kuormatraktori	pitkäpuomiharvesteri 1 + kuormatraktori		pitkäpuomiharvesteri 2 + kuormatraktori
		Korjuuketjulla korjattu osuus, %											
O	1: set harvennushakkuut											1 320	
	Muut	30	100									3 300	
	Väljennushakkuut	71	70									6 930	
	Kuituvalt. avohakkuut		29									660	
	Keskijäreät		100									4 950	
Tukkivalt.		31	69									15 840	
			13			25	38			2			
A	1: set harvennushakkuut				100							1 320	
	Muut				100							3 300	
	Väljennushakkuut				100							6 930	
	Kuituvalt. avohakkuut			100								660	
	Keskijäreät									100		4 950	
Tukkivalt.										100	15 840		
B	1: set harvennushakkuut				100							1 320	
	Muut				100							3 300	
	Väljennushakkuut				100							6 930	
	Kuituvalt. avohakkuut			100								660	
	Keskijäreät								100			4 950	
Tukkivalt.											15 840		
C	1: set harvennushakkuut				100							1 320	
	Muut				100							3 300	
	Väljennushakkuut				100							6 930	
	Kuituvalt. avohakkuut			100								660	
	Keskijäreät			98								4 950	
Tukkivalt.						38	37	2	2	21	15 840		
D	1: set harvennushakkuut				85	100						1 320	
	Muut				100	15						3 300	
	Väljennushakkuut				100							6 930	
	Kuituvalt. avohakkuut			100								660	
	Keskijäreät				100							4 950	
Tukkivalt.				100							15 840		
E	1: set harvennushakkuut				53	100						1 320	
	Muut				100	47						3 300	
	Väljennushakkuut				100							6 930	
	Kuituvalt. avohakkuut			100								660	
	Keskijäreät			100								4 950	
Tukkivalt.			13			26	38	2	2	21	15 840		
F	1: set harvennushakkuut					100						1 320	
	Muut					100						3 300	
	Väljennushakkuut					100						6 930	
	Kuituvalt. avohakkuut			100								660	
	Keskijäreät			98								4 950	
Tukkivalt.						38	37	2	2	21	15 840		
G	1: set harvennushakkuut					100						1 320	
	Muut					100						3 300	
	Väljennushakkuut					100						6 930	
	Kuituvalt. avohakkuut					11						660	
	Keskijäreät			57				100				4 950	
Tukkivalt.			54			25	39	4		21	15 840		

TAULUKKO 9
Table

Eri vaihtoehtoissa käytettävät resurssit. Vuosi 1986. Korjattava puumäärä 36,40 milj. m³
Resources used in the different alternatives. Year 1986. Quantity of timber to be harvested 36.40 million m³(s)

Resurssit - Resources	Vaihtoehto - Alternative							
	O	A	B	C	D	E	F	G
Ihmistyöpanos, milj. h Human labour input, million hours								
- hakkuussa - in cutting	8.50	2.00	1.40	4.57	1.42	1.85	4.59	4.84
- konetyössä - in mechanised work	4.00	4.30	4.60	3.96	4.58	4.75	3.91	3.83
Yhteensä - Total	12.50	6.30	6.00*	8.53	6.00*	6.60*	8.50*	8.67
Konetyöpanos, 1 000 h Mechanised work input, 1,000 hours								
- iso kaato-kasauskone large feller-buncher	22.9	-	20.0*	-	20.0*	20.0*	50.0	20.0*
- keskisuuri prosessori medium-sized processor	110.0	-	100.0*	-	100.0*	551.5	100.0*	100.0*
- iso prosessori large processor	167.1	-	170.0*	-	170.0*	170.0*	170.0*	170.0*
- pitkäpuomiharvesteri 1 long-boom harvester	-	1 473.8	924.8	944.0	920.0	409.3	216.7	199.6
- pitkäpuomiharvesteri 2 long-boom harvester	394.5	-	383.0*	-	383.0*	383.0*	383.0*	383.0*
- esikasustraktori bunching tractor	-	-	19.5	-	100.3	333.0	365.1	384.4
- kaato-juontokone feller-skidder	-	-	-	-	3.6	32.9	148.0	0.0*
- kuormatraktori forwarder	2 590.7	1 604.1	1 748.7	1 214.8	1 897.8	1 793.0	1 741.2	1 868.6
- liukupuomikuormatraktori forwarder equipped with far-reaching loader	-	447.0	232.6	993.0	-	-	-	-
Kokonaisinvestoinnit, Total investments, Mmk million marks	585.3	555.9	606.4	510.0*	600.0*	600.0*	525.8	523.3
Korjuun kokonaiskustannukset, Mmk Total costs of harvesting, million marks	2 601.60	2 058.90	2 175.90	2 060.30	2 182.90	2 270.90	2 255.10	2 205.70
Korjuun yksikkökustannukset, mk/m ³ Unit costs of harvesting, marks/m ³ (s)	71,47	56,56	59,78	56,60	59,97	62,39	61,95	60,60
Korjuun yksikkötyöpanos, h/m ³ Unit labour input in harvesting, hours/m ³ (s)	0.35	0.17	0.16	0.23	0.16	0.18	0.23	0.24

* Ennalta asetettu muuttujan rajoitusarvo
Pre-determined constraint value of the variable

Eri korjuuketjuilla leimikkotyypeittäin korjattavien puumäärien suhteelliset osuudet. Vuosi 1986. Kokonaispuumäärä 36.40 milj. m³. (Vahvistetut luvut 30 min ajouraväliä)

Vaihtoehto	Leimikkotyyppi	Korjuuketju										Kuumäärät, 1000 m ³		
		2 m, hakuu ajouran varteen + kuormatraktori	noin 3 m, hakuu ajouran varteen + kuormatraktori	noin 5 m, suorinta + kuormatraktori	noin 5 m, hakuu levälleen + liukupuomikuormatraktori	noin 5 m, Leka-menetelmä + liukupuomikuormatraktori	noin 5 m, Leka-menetelmä + esikasaatraktori + kuormatraktori	suunnattu kaato + esikasaatraktori + keskisuuri prosessori + kuormatraktori	pieni kaato-kasaukone + keskisuuri prosessori + kuormatraktori	pitkäpuomiharvesteri 2 + kuormatraktori	suunnattu kaato + keskisuuri prosessori + kuormatraktori		suunnattu kaato + iso prosessori + kuormatraktori	kaato-juontokone + iso prosessori varustolla
Korjuuketjuilla korjattu osuus, %														
O	1:set harvennushakkuut	30	100										1 456	
	Muut	49	70										4 004	
	Väljennushakkuut		51										7 280	
	Kuituvalt. avohakkuut		43	57									728	
	Keskijäreät			39									5 824	
Tukkivalt.								85	17	32	12		17 108	
A	1:set harvennushakkuut				100								1 456	
	Muut				100								4 004	
	Väljennushakkuut									100			7 280	
	Kuituvalt. avohakkuut									100			728	
	Keskijäreät									100			5 824	
Tukkivalt.									100			17 108		
B	1:set harvennushakkuut				100								1 456	
	Muut				33		19						4 004	
	Väljennushakkuut										48		7 280	
	Kuituvalt. avohakkuut										100		728	
	Keskijäreät										44		5 824	
Tukkivalt.								6	83		56		17 108	
C	1:set harvennushakkuut				100								1 456	
	Muut				100								4 004	
	Väljennushakkuut			32	100								7 280	
	Kuituvalt. avohakkuut				100								728	
	Keskijäreät				100								5 824	
Tukkivalt.				100								17 108		
D	1:set harvennushakkuut					100							1 456	
	Muut					31	19						4 004	
	Väljennushakkuut										50		7 280	
	Kuituvalt. avohakkuut										100		728	
	Keskijäreät										39		5 824	
Tukkivalt.						6	83			10		17 108		
E	1:set harvennushakkuut				100								1 456	
	Muut				15		85						4 004	
	Väljennushakkuut						69						7 280	
	Kuituvalt. avohakkuut										100		728	
	Keskijäreät										100		5 824	
Tukkivalt.						6	83				8	3	17 108	
F	1:set harvennushakkuut				100								1 456	
	Muut				100								4 004	
	Väljennushakkuut				100								7 280	
	Kuituvalt. avohakkuut										100		728	
	Keskijäreät										24		5 824	
Tukkivalt.						2	83			4		72	15	17 108
G	1:set harvennushakkuut				100								1 456	
	Muut				100								4 004	
	Väljennushakkuut				100								7 280	
	Kuituvalt. avohakkuut											5		728
	Keskijäreät										95		5 824	
Tukkivalt.										6	83		17 108	

3.2.4 Vuosi 1986

Rajoitusarvot on taulukossa 9 (s. 19) merkitty tähdellä.

Vaihtoehto O. Vertailuvaihtoehto. Tässä vaihtoehdossa oletettiin työllistettävän Metsätehon laskelman mukainen konekanta. Muilta osin on käytössä nykyiset korjuun menetelmät kuitenkin siten, että korjatun kuitupuu pituusjakama on taulukon 4 (s. 13) mukainen (ei optimaalinen ratkaisu).

Vaihtoehto A. Resurssi- ja työvoimaraajoituksia ei ole. Ihmistekoinen kasaus sallitaan nykyisissä muodoissaan.

Vaihtoehto B. Korjuun kehittämislaskelman mukainen konekalusto oletetaan työllistetyksi. Ihmistyövoimaa arvioidaan olevan vuonna 1986 käytettävissä koko korjuuseen vain 6 milj. tuntia.

Vaihtoehto C. Kuten vaihtoehto A, paitsi että metsäkoneisiin investoitavissa olevien varojen kasvu on oletettu rahanarvon alenemisivauhdin (9 %/a) suuriseksi. Näin ollen investointirajoituksena pidetään 510 milj. markkaa vuositasona.

Vaihtoehto D. Kuten vaihtoehto B eli työvoimaraajoitus 6 milj. tuntia vuodessa ja kehittämislaskelman mukainen konekanta on työllistettävä. Lisäksi investointirajoitus nostettiin 600 milj. markkaan vuodessa.

Vaihtoehto E. Työvoimaraajoitus on 6.6 milj. tuntia vuodessa, investointirajoitus pysyy 600 milj. markkana vuodessa eikä kapeana, 15...25 m:n ajouravälin käyttöä harvennushakkuissa sallita.

Vaihtoehto F. Työvoimaraajoitusta kohotetaan edelleen 8.5 milj. tuntiin vuodessa, investointirajoituksena pysyy 600 milj. markkaa vuodessa, kapeaa, 15...25 m:n ajouraväliä ja korjuukoneiden käyttöä harvennushakkuissa ei sallita.

Vaihtoehto G. Työvoimaraajoitusta nostetaan edelleen 9 milj. tuntiin vuodessa, investointirajoitus on 600 milj. markkaa vuodessa, kapeaa, 15...25 m:n ajouraväliä ja koneita harvennushakkuissa ei sallita. Koneiden joukosta on poistettu kaato-juontokone.

Optimoinnin perusteella on korjuukustannuksiltaan edullisin vaihtoehto A, jossa harvestereilla korjattaviksi ovat siirtyneet kaikki avohakkuuleimikot sekä väljen-

nushakkuuleimikot. Muissa harvennushakkuissa pitkä kuitupuu hakataan levälleen ja kuljetetaan pitkäpuomikuormatraktorilla (ks. taulukkoa 10, s. 20).

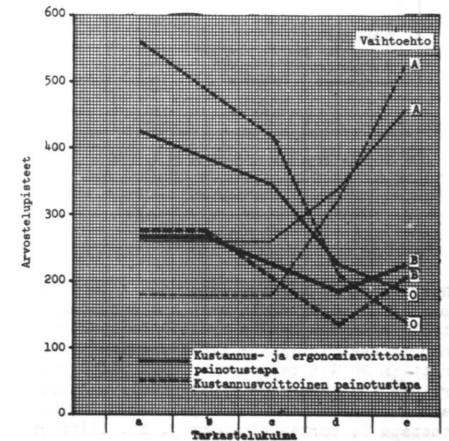
3.3 Edullisuusanalyysin tulokset

3.3.1 Vuosi 1977

Taulukko 11 (s. 22) on vuoden 1977 tuotosten ja kustannusten mukainen yhdistelmä suoritettuista edullisuusvertailuista. Taulukon luvut on laskettu sivulla 10 esitetyn kaavan avulla ja käyttäen liitteen 4 taulukoissa 1 ja 2 (s. 35) esitettyjä painoarvoja.

Vuoden 1977 tason tarkasteluissa rajautui painotustavasta riippumatta kolmen parhaan joukosta pois ainoastaan vaihtoehto F. Paras vaihtoehto painotustavan mukaan on joko O, A tai B.

Kuvassa 5 on esitetty vaihtoehtojen O, A ja B pistearvojen muodostuminen graafisesti.



Tarkastelukulma

Kokonaiskustannukset	Kustannus- ja työllistämisaikutusten osatekijän komponenttien painoarvot tarkastelukulman mukaan				
	50	20	50	30	20
Investoinnit	10	10	10	10	10
Työvoimakustannukset	30	50	-	-	-
Yleiskustannukset	10	20	10	20	20
Työllistämisen	-	-	30	40	50
Yhteensä	100	100	100	100	100

Kuva 5. Vaihtoehtojen O, A ja B arvostelupisteet vuoden 1977 tarkastelukulman ja painotuksen mukaan (vrt. taulukkoon 11, s. 22)

TAULUKKO 11 Vaihtoehtojen paremmuuden riippuvuus painotustavasta ja tarkastelukulmasta. Vuosi 1977
(=== = paras, --- = 2:seksi paras, --- = 3:nneksi paras)

Painotustapa *)	Tarkastelukulma *)	Vaihtoehto						
		O	A	B	C	D	E	F
		Arvostelupisteet						
I Kustannus- ja ergonomiavoittoinen	a	425	260 ===	265 ---	405 ---	480	485	480
	b	385	260 ===	265 ---	405	520	525	440
	c	345	260 ---	225 ---	445	480	485	560
	d	225	340 ---	185 ---	525	480	485	560
	e	185 ---	460	225 ---	525	440	405 ---	560
II Kustannusvoittoinen	a	560	180 ---	275 ---	305 ---	445	550	485
	b	490	180 ---	275 ---	305 ---	515	620	415
	c	420	180 ---	205 ---	375 ---	445	550	625
	d	210	330 ---	135 ---	515	445	550	625
	e	140 ---	530	205 ---	515	375 ---	420	625
III Kustannus-, ergonomia- ja puuntuotanto-voittoinen	a	340	295 ---	235 ---	455	520	460	495
	b	310	295 ---	235 ---	455	550	490	465
	c	280	295 ---	205 ---	485	520	460	555
	d	190	355 ---	175 ---	545	520	460	555
	e	160 ---	445	205 ---	545	490	400 ---	555

*) Ks. liitteen 4 taulukoita 1 ja 2, s. 35

Nykyisessä suhdannetilanteessa katsottiin parhaaksi menettelytavaksi kustannusten ja työllistämisen osalta työllistämisperusteinen tarkastelu, jossa työllistämiseksi annettiin 40 %:n painoarvo. Myös päätösmatrisiin kustannus- ja työllistämisaikutuksille annettiin 40 %:n painoarvo (painotustapa I, tarkastelukulma d, ks. liitteen 4 taulukoita 1 ja 2, s. 35).

Valittujen painoarvojen mukaan parhaaksi kasauksen toteuttamistavaksi vuonna 1977 osoittautui vaihtoehto B, joka ergonomiselta kannalta on nykyisin käytössä olevia korjuumenetelmiä selvästi parempi. Käytännössä se merkitsee sitä, että luovutaan noin 3 m:n kuitupuun ihmistekoisesta ajo-uran varteen kasauksesta. Kuormatraktoreihin asennetaan pitkälle ulottuvia kuormaimia, joilla kasataan kuormauksen yhteydessä. Avohakkuulla käytetään ihmistyö-

valtaisissa menetelmissä pitkän puutavaran suorintahakkuuta, sekä määrämittaisen 2 m kuitupuun hakkuuta kourakosoihin sekä paltalle että ajouran varteen. Harvennushakkuussa tulee käyttöön noin 3 m kuitupuun hakkuu Leka-menetelmällä sekä väljennys-hakkuussa lähinnä noin 5 m kuitupuun hakkuu Leka-menetelmällä.

Vaihtoehto B:n mukainen toiminta merkitsee käytännössä myös sitä, että olemassa oleva konekanta työllistetään. Korjuutyövoiman työllistämisen kannalta se merkitsee vain 10 %:a pienempää työvoimamäärää verrattuna eniten työllistävään vaihtoehtoon O.

Käyttöön tulevat hakkuumenetelmät ovat uusia kehittyneitä menetelmiä sekä ergonomisesti keivollisia "vanhoja" hakkuumenetelmiä (taulukko 6, s. 15).

TAULUKKO 12 Vaihtoehtojen paremmuuden riippuvuus painotustavasta ja tarkastelukulmasta. Vuosi 1981
(=== = paras, --- = 2:seksi paras, --- = 3:nneksi paras)

Painotustapa *)	Tarkastelukulma *)	Vaihtoehto							
		O	A	B	C	D	E	F	G
		Arvostelupisteet							
I Kustannus- ja ergonomiavoittoinen	a	620	255 ---	300 ---	455	480	435 ---	505	550
	b	620	255 ---	300 ---	455	530	435 ---	455	550
	c	520	455 ---	350 ---	505	280 ---	335 ---	605	550
	d	370	605	500	555	280 ---	335 ---	555	400
II Kustannusvoittoinen	a	685	195 ---	260 ---	400 ---	480	425	550	605
	c	545	475	330 ---	470	200 ---	285 ---	690	605
	d	335	685	540	540	200 ---	285 ---	620	395
III Kustannus-, ergonomia- ja puuntuotanto-voittoinen	a	620	245 ---	305 ---	470	510	440 ---	470	540
	c	540	405	345 ---	510	350 ---	360 ---	550	540
	d	420	525	465 ---	550	500	360 ---	510	420

*) Ks. liitteen 4 taulukoita 3 ja 4, s. 35

Korjuukustannuksia voidaan alentaa noin 6,5 %. Koneinvestointeja voidaan vähentää resurssien optimaalisella kohdentamisella. Puuntuotannollisista tekijöistä samoin kuin puutavaran laadusta joudutaan jossakin määrin tinkimään.

Korjuu vaihtoehdossa B voidaan hoitaa nykyistä kevyemmällä organisaatiolla koneellistamisen ja suuren tuottavuuden ansiosta.

Mikäli kustannusten minimointia pidetään tärkeänä tai erittäin tärkeänä (painotustavat I ja II, tarkastelukulmat a ja b), yleensä voimakasta koneellistamista suosiva vaihtoehto A on paras. Se on myös ergonomisesti varsin "hyvä" vaihtoehto.

Jos taas työllistäminen ergonomisten tekijöiden ohella (painotustavat I ja II, tarkastelukulmat c, d ja e) asetetaan tärkeäksi tai erittäin tärkeäksi ja kustannukset minimoidaan, parhaita ovat vaihtoehdot B ja O.

Vaihtoehto O merkitsee pitäytymistä nykyisin käytössä olevissa menetelmissä.

Arvioitaessa vaihtoehto B:n merkitystä kasauksen toteuttamisvaihtoehtona on muistettava, että painoarvot, joiden perusteella vaihtoehto B tuli valituksi parhaaksi, perustuvat vain kirjoittajan omiin käsityksiin eri tekijöiden merkityksestä.

3.3.2 Vuodet 1981 ja 1986

Vuosien 1981 ja 1986 tasoilla jotain tiettyä painotustapaa ei valittu muita paremmaksi.

Jos työvoiman työllistäminen vielä vuonna 1981 on ongelma, parhaita ovat vaihtoehdot B, D ja E. Kustannuksia kohtalaisesti tai tuntuvasti painottavan painotustavan mukaan (painotustavat I ja II, tarkastelukulmat c ja d, ks. liitteen 4 taulukoita 3 ja 4, s. 35) paras on vaihtoehto D.

Vaihtoehdossa D on raskaasta koneellistamisesta jouduttu luopumaan lähinnä investointirajoituksen vuoksi (250 milj. mk/a). Ihmistyövaltaisessa hakkuussa käytetään totaalisesti uusia hakkuumenetelmiä, siis suorintaa avohakkuussa ja pitkän kuitupuun

TAULUKKO 13 Vaihtoehtojen paremmuuden riippuvuus painotustavasta ja tarkastelukulmasta. Vuosi 1986
(=== = paras, --- = 2:seksi paras, --- = 3:nneksi paras)

Painotustapa*)	Tarkastelu- kulma	Vaihtoehto							
		O	A	B	C	D	E	F	G
		Arvostelupisteet							
I Kustannus- ja ergonomia- voittoinen	a	615	<u>225</u> ===	<u>390</u> ---	<u>290</u> ---	455	675	490	460
	b	615	<u>225</u> ===	<u>340</u> ---	<u>390</u> ---	405	675	440	510
II Kustannus- voittoinen	a	685	<u>180</u> ---	<u>355</u> ---	<u>255</u> ---	435	685	535	470
	b	685	<u>180</u> ---	<u>285</u> ---	395	<u>365</u> ---	685	465	540
III Kustannus-, ergonomia- ja puuntuotanto- voittoinen	a	615	<u>200</u> ---	<u>385</u> ---	<u>285</u> ---	470	690	475	480
	b	615	<u>200</u> ---	<u>345</u> ---	<u>365</u> ---	430	690	435	520

*) Ks. liitteen 4 taulukoita 3 ja 4, s. 35

hakuuta Leka-menetelmällä harvennuksissa. Kasauksessa käytetään erillistä esikasaustraktoria sekä kuormatruktorin pitkäpuomikuormainta. Korjuukustannuksiltaan edullisimpaan vaihtoehtoon A verrattuna yksikkökustannukset kasvavat 5,7 %.

Mikäli työllistäminen ja ergonomiset tekijät saavat runsaasti painoa (painotustapa III, tarkastelukulmat c ja d), parhaita ovat vaihtoehdot B ja E.

Vaihtoehto B merkitsee koneellistamista kaato-kasauksineiden ja prosessoreiden avulla. Ihmistyövaltaisessa hakkuussa käytetään suurinta avohakuussa ja levälleen hakkuuta harvennuksissa. Puutavara kasataan kuormatruktorin pitkäpuomikuormaimella metsäkuljetuksen yhteydessä (taulukko 8, s. 18).

Vaihtoehdon E mukaan 1. ja 2. harvennuksessa pitkä kuitupuu hakataan Leka-menetelmällä ja kasataan esikasaustraktorilla. Väljennyksissä pitkä kuitupuu hakataan levälleen ja kasataan kuormauksen yhteydessä liukupuomikuormaimella.

Metsätalon kehityslaskelman konekanta työllistetään avohakuissa, joissa myös kuituvaltaisissa ja keskijäreissä avohakkuuleimikoissa käytetään suurintahakuuta.

Mikäli vaihtoehtojen työllistämisvaikutuksia ei enää vuonna 1981 pidetä tarpeellisina ottaa huomioon, vaan tarkastellaan pelkkiä kustannuksia (tarkastelukulmat a ja b), toimintavaihtoehto A on painotustavasta riippumatta paras.

Tämä merkitsee puunkorjuun koneellistamista mahdollisimman pitkälle sekä siirtymistä ihmistyövaltaisessa hakkuussa täydelleen pitkän kuitupuun hakkuuseen uusia hakkuumenetelmiä käyttäen. Puutavaran kasaus ihmistyövaltaisen hakkuun yhteydessä on edullisinta tehdä kuormaa kantavaan metsätraktoriin asennetulla pitkäpuomikuormaimella.

Vuoden 1986 vaihtoehtojen edullisuutta tarkastellaan vain kustannuspohjalta, sillä pitkällä aikavälillä tulee pyrkiä mahdollisimman alhaiset kustannukset aiheuttaviin korjuumenetelmiin ja myös työvoimalla on tällöin mahdollisuus joustaa ja sopeutua rationaalisiiin korjuumenetelmiin (tarkastelukulmat a ja b, ks. liitteen 4 taulukkoa 4, s. 35).

Vuonna 1986 vaihtoehto A on painotustavasta riippumatta paras.

Vaihtoehdon toteutus merkitsisi myös harvennushakuiden koneellistamista mahdolli-

simman pitkälle. Käytössä olisivat yksinomaan harvesterityyppiset monitoimikoneet. Pitkä kuitupuu hakattaisiin ihmistyönä levälleen vain harvennuksissa ja kasattaisiin metsätraktorin pitkäpuomikuormaimilla.

Taulukoiden 11, 12 ja 13 (s. 22, 23 ja 24) lukuarvoja ei voida verrata keskenään. Niiden avulla ei myöskään voida päätellä vaihtoehtojen suhteellista paremmuutta kyseisinä vuosina. Luvut kertovat vain vaihtoehtojen paremmuusjärjestyksen, joka on riippuvainen käytetystä painotuksesta.

4 PÄÄTELMIÄ

Tämänlaatuinen kolmivaiheinen tarkastelu, jossa kussakin on useita erilaisia moneen suuntaan vaikuttavia tekijöitä, on varsin herkkä syötteen muutoksille.

Laskentamenetelmän kolmikerroksisuudesta johtuu, ettei lopputuloksen herkkyyttä koneiden tuotos- ja kustannustietojen ja muiden simulointimallin syöttötietojen, kuten leimikkorakenteen ja puustotietojen, muutoksille voitu tutkia.

Edullisuusanalyysissä eniten vaihtoehtojen keskinäiseen järjestykseen vaikuttaa painoarvojen valinta. Tulosten luotettavuus riippuu käytettyjen painoarvojen luotettavuudesta. Tältä osin tutkimus on ehkä kaikkein subjektiivisin.

Lisäksi lopputulokseen vaikuttaa tietenkin se, että koko arvosteluasteikko "pakotetaan" käyttöön eri osatekijöiden paremmuuden arvioinnissa, vaikkei se olisi aina perusteltua. Tämän vaihtelun vaikutusta lopputulokseen ei kuitenkaan operationaalisten vaikeuksien ja subjektiivisuuden välttämiseksi haluttu tutkia.

Edellä esitettyjen näkökohtien pohjalta tämän tutkimuksen tulokset antavat vain lähinnä pääpiirteisiä kehityssuuntia ja kartoittavat niiden välisiä yhteyksiä. Lopputuloksia voidaan siis tulkita vain sillä mittasteikolla, jota käyttäen ne on saatu.

Kustannus-hyötyanalyysiä eri muunnoksineen on jo varsin kauan käytetty yhteiskuntataloudellisten ja muiden suurien projektien toteuttamiskelpoisuuden analysointiin. Periaatteessa ei ole olemassa estettä sille, etteikö kustannus-hyötyanalyysiä varten kehitettyä systemaattista ongelmien analysointitekniikkaa voitaisi käyttää myös muiden suppeampien, mutta silti moniulotteisten ongelmakokonaisuuksien analysointiin esimerkiksi metsätaloudessa. Tässä tutkimuksessa esitetty analyysitekniikan sovellutus onkin käsiteltävä juuri tällaiseksi kokeiluksi.

Tutkimuksen antamien kokemusten pohjalta voidaan käytetyn ongelman lähestymistavan todeta soveltuvan myös puunkorjuuta koskevan problematiikan ratkaisemiseen ja uskoa sen osaltaan edesauttavan sekä analyysin teorian että sovellutusten kehittämisessä.

KIRJALLISUUTTA

References

- ELOVIRTA, P. 1976. Metsätalouden työvoiman tarjonta Suomessa 1945-1974 ja ennuste vuosille 1975-1985. Summary: Forest Labour Supply in Finland 1945-1974 and a Forecast to Years 1975-1985. Metsäntutkimuslaitos - Institutum Forestale Fenniae, Folia Forestalia 271. Helsinki
- ESKELINEN, A.- MIKKONEN, E.- MYLLYNIEMI, A.- PELTONEN, J. 1978. Eri runkopuunkorjuumenetelmien taloudellisuuden kehitys vuosina 1978-1986. Summary: The Development of the Economicness of Stemwood Harvesting Methods in 1978-1986. Metsätehon tiedotus - Metsäteho Report 351. Helsinki
- HANNELIUS, S. - LILLANDT, M. 1970. Puuston vaurioituminen harvennusleimikoiden koneellisessa korjuussa. Summary: Damaging of Stand in Mechanized Thinning. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos - University of Helsinki, Department of Logging and Utilization of Forest Products. Tiedonantoja N:o - Research notes No. 4. Helsinki
- HARSTELA, P. 1975. Työajan menekkiin ja työntekijän kuormittumiseen vaikuttavat tekijät eräissä metsätömenetelmissä. Teoreettinen ja empirinen 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. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja - Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 87.2. Helsinki
- " - 1977. Ergonomic and Technic Aspects of Bunching Round Timber in Thinnings. Seloste: Kasauksen ergonomia ja teknologia harvennushakkuissa. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja - Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 89.4. Helsinki
- HARSTELA, P. - JÄRVINEN, J. - TERVO, L. - AHOLAINEN, R. 1977. Tutkimus eräistä harvennushakkuumenetelmistä (Levälle teko ja LEKA-menetelmä). Summary: The Study of Some Short Wood Methods of Cutting in Thinnings (Cutting Without Bunching and SCAPE Method). Metsäntutkimuslaitos - Institutum Forestale Fenniae, Folia Forestalia 310. Helsinki
- HOEFLE, H.H. 1974. Techniques for Analysis, Comparison and Choice of Harvesting Systems - A Central European Point of View. Forest Harvesting Mechanization and Automation. IUFRO. Proceedings, Division 3. Canadian Forestry Service, Department of the Environment, sivut - pages 399-416. Ottawa
- JOHNSEN, E. 1968. Studies in Multiobjective Decision Models. Studentlitteratur. Lund
- KLEN, T. - LOUHEVAARA, V. 1976. Kuitupuun kasauksen keventämisen ratkaisumahdollisuuksia harvennushakkuissa. Työterveyslaitoksen katsauksia 9. Vantaa
- KÄRKKÄINEN, M. 1969. Metsän vaurioituminen kesäaikaisessa puunkorjuussa. Summary: The Amount of Injuries Caused by Timber Transportation in the Summer. Suomen Metsätieteellinen Seura - Societas Forestalis Fenniae, Acta Forestalia Fennica Vol. 100, 1969. Helsinki
- MIKKONEN, E. 1976. Lajittelu kaatojuontokoneella. Summary: Sorting by Using a Feller-Buncher. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos - University of Helsinki, Department of Logging and Utilization of Forest Products. Tiedonantoja N:o - Research notes No. 32. Helsinki
- PITKÄNEN, E. 1971. Hyötykustannusanalyysi. Kyriiri Oy. Helsinki
- Puutavaran kasausta ja koneellista hakkuuta käsittelevät Metsätehon julkaisut vuosilta 1970-1978. Metsäteho publications in 1970-1978 on the bunching and mechanised cutting of timber
- Puutavaran kasausta käsittelevät Forskningsstiftelsen Skogsarbeten julkaisut vuosilta 1970-1978. Forskningsstiftelsen Skogsarbeten publications in 1970-1978 on the bunching of timber
- Puutavaran koneellisen kasauksen ohjemaksut Etelä-Suomessa 1.2.1977-31.1.1978
- TEIKARI, E. 1977. Traktorin ergonomiset ominaisuudet puutavaran lähikuljetuksessa. Summary: The Ergonomical Properties of Tractor in the Forest Haulage of Timber. Työtehoseuran julkaisuja - Publications of the Work Efficiency Association 195. Helsinki
- Valtiovarainministeriö, suunnittelusihteeristö. 1975. Toimenpiteiden hyötyjä ja haittoja koskevat selvitykset. Helsinki
- WUOLIJOKI, E. 1976. Metsäkoneiden heilunnan ergonomiset haitat. Summary: Ergonomical Effects of Jolting of Forest Machines. Suomen Metsätieteellinen Seura - Society of Forestry in Finland, Silva Fennica Vol. 10 1976, N:o - No. 2: 87-93. Hämeenlinna
- "- 1977. Monitoimikoneet - työturvallisuus. Summary: Multi-Process Machines - Safety at Work. Työtehoseuran julkaisuja - Publications of the Work Efficiency Association 199. Helsinki

DEVELOPMENT ALTERNATIVES IN THE BUNCHING OF TIMBER

By Esko Mikkonen

Summary

The study examines the advantages of the development alternatives in the bunching of timber against a framework based on systems analysis. The development alternatives are estimated by utility analysis taking into consideration the effect of different incommensurable factors on decision making.

When all standpoints influencing the matter were taken into consideration the best alternative for timber bunching in 1977 proved to be the one in which new labour-intensive cutting methods, that is straightening-cutting in clear cutting operations and cutting of 3-m and 5-m pulpwood in thinnings by the Leka method, were employed. Manual bunching of 3-m pulpwood alongside the strip road has been abandoned in cutting. Only 2-m pulpwood is bunched manually. The most economical alternative is cutting timber by the Leka method and bunching it in connection with loading by a far-reaching loader mounted on the forwarder. This alternative is distinctly superior to the other ones ergonomically. Harvesting costs are reduced by about 6.5 % compared with the alternative illustrative of the current situation, it is possible to lower the level of machine investments through correct allocation of

resources and harvesting can be managed by a lighter harvesting organisation than today. However, the employment of loggers will keep at a relatively high level. The existing machine stock is utilised.

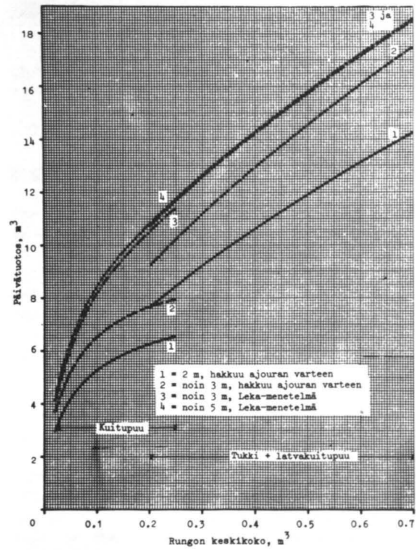
In 1981, the best alternative as regards costs will be the one in which mechanisation has been taken as far as possible. In labour-intensive cutting, there will be a complete change to the cutting of long pulpwood by new cutting methods. Bunching will be done in connection with loading by the far-reaching loader of the forwarder.

If employment will still be a problem in 1981, the best alternative is going to be the one in which mechanisation is used in final cutting in accordance with Metsäteho's development calculation (degree of mechanisation around 42 %). New cutting methods will be used in labour-intensive cutting. It is advantageous in bunching proper to use a separate bunching tractor and the far-reaching loader of the forwarder.

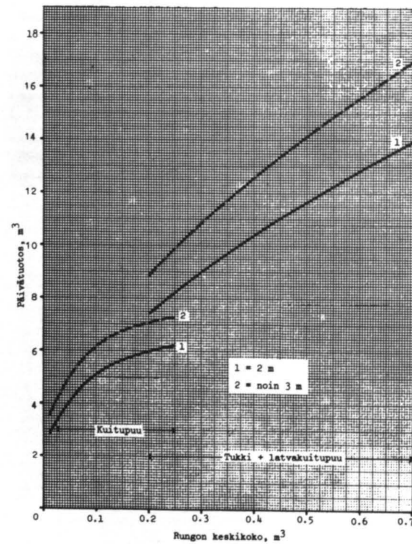
The alternative in which cutting and thus also bunching is extensively mechanised will be the best one in 1986.

LIITTEET

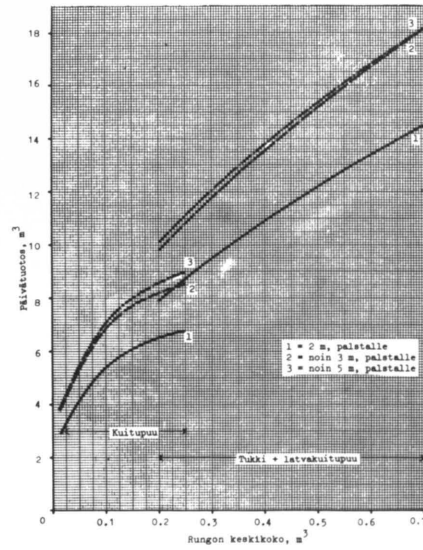
Kuvat 1-13. Perusteina käytetyt tuotokset



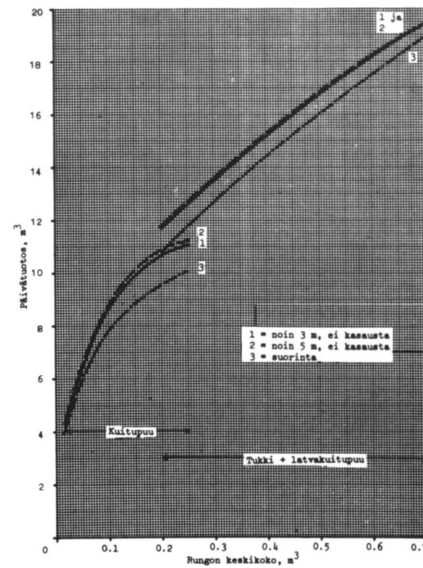
Kuva 1. Ihmistyövaltaisen hakkuun päivätuotos eräissä menetelmissä. Puulaji kuusi, ajouraväli 15...25 m



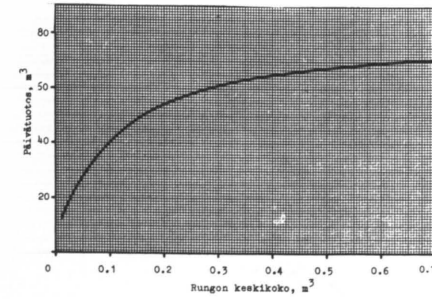
Kuva 2. Ihmistyövaltaisen hakkuun päivätuotos 2 m ja noin 3 m kuitupuu ajouran varten. Puulaji kuusi, ajouraväli 25...35 m



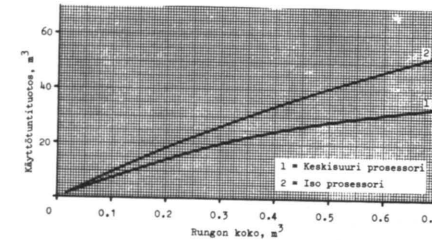
Kuva 3. Ihmistyövaltaisen hakkuun päivätuotos. Kuitupuu palstalle kourakasoihin. Puulaji kuusi



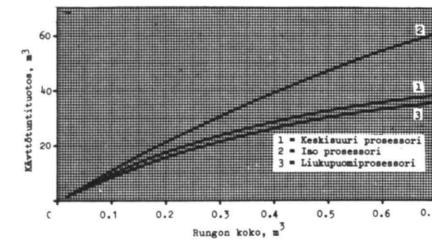
Kuva 4. Ihmistyövaltaisen levälleenhakkuun ja suurintahakkuun päivätuotos. Puulaji kuusi



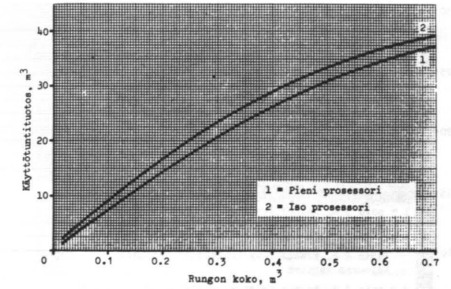
Kuva 5. Ihmistyövaltaisen hakkuun päivätuotos suunnatussa kaadossa



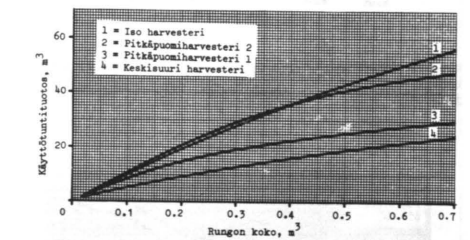
Kuva 6. Prosessoreiden käyttötuntituotos palstalla. Puulaji kuusi



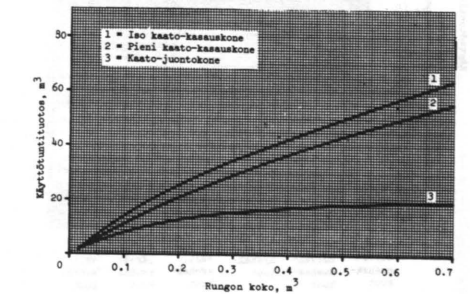
Kuva 7. Prosessoreiden käyttötuntituotos ajouralla. Puulaji kuusi



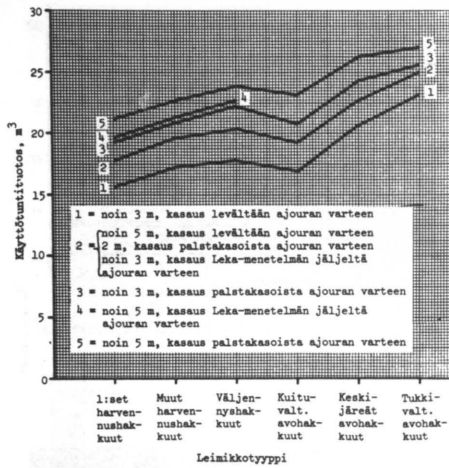
Kuva 8. Prosessoreiden käyttötuntituotos varastolla. Puulaji kuusi



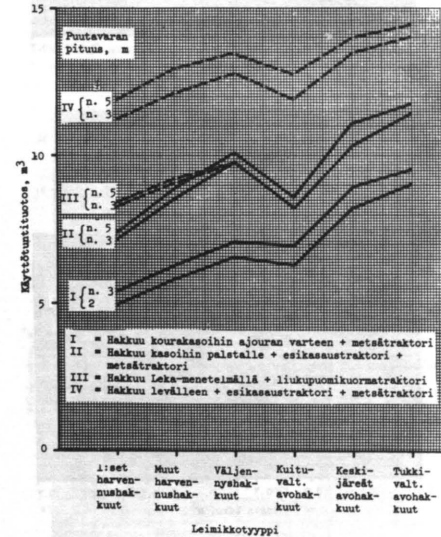
Kuva 9. Harvestereiden käyttötuntituotokset. Puulaji kuusi



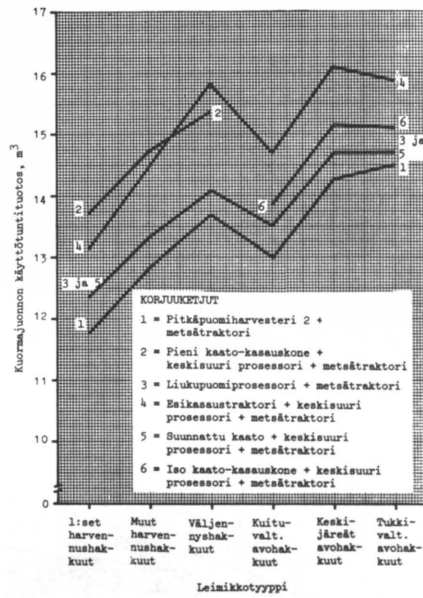
Kuva 10. Kaato-kasaukoneiden ja kaato-juontokoneen käyttötuntituotokset. Puulaji kuusi. Juontomatka 150 m



Kuva 11. Esikasustraktorin keskimääräinen käyttötuntituotos eri leimikkotyypeissä eri hakkuumenetelmien jäljeltä. Laskettu simuloimalla. Ajouraväli 15...25 m



Kuva 12. Eräiden ihmistyövaltaisten hakkuumenetelmien jälkeinen kuormajuonnin keskimääräinen käyttötuntituotos puutavaralajin pituuden mukaan eri leimikkotyypeissä. Metsäkuljetusmatka 300 m, 2. maastoluokka, ajouraväli 15...25 m



Kuva 13. Eräiden korjuukoneiden jälkeinen kuormajuonnin keskimääräinen käyttötuntituotos eri leimikkotyypeissä. Metsäkuljetusmatka 300 m, 2. maastoluokka, ajouraväli 15...25 m

TAULUKKO

Simuloinnin korjuuketjut ja niiden käyttömahdollisuudet eri olosuhteissa

Korjuuketju, n:o	Harven-nus-hakkuu	Avo-hakkuu	Ajouraväli, m		Korjuuketju
			15...25	25...35	
1	x	x	x	x	Tavaralajimenetelmä, 2 m, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
2	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
3	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, Leka-menetelmä + esikasustraktori + kuormatraktori
4	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, Leka-menetelmä + esikasustraktori + kuormatraktori
5	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, Leka-menetelmä + liukupuomikuormatraktori
6	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, Leka-menetelmä + liukupuomikuormatraktori
7	x	x	x	x	- - - , 2 m, hakkuu palstalle kasoihin + vintturilla varustettu maataloustraktori + kuormatraktori
8	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu palstalle kasoihin + vintturilla varustettu maataloustraktori + kuormatraktori
9	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, hakkuu palstalle kasoihin + vintturilla varustettu maataloustraktori + kuormatraktori
10	x	x	x	x	- - - , 2 m, hakkuu palstalle kasoihin + esikasustraktori + kuormatraktori
11	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu palstalle kasoihin + esikasustraktori + kuormatraktori
12	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, hakkuu palstalle kasoihin + esikasustraktori + kuormatraktori
13	x	x	x	x	- - - , 2 m, hakkuu palstalle kasoihin + liukupuomikuormatraktori
14	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu palstalle kasoihin + liukupuomikuormatraktori
15	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, hakkuu palstalle kasoihin + liukupuomikuormatraktori
16	x	x	x	x	- - - , 2 m, hakkuu palstalle kasoihin + pieni laahusjuontotraktori
17	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu palstalle kasoihin + pieni laahusjuontotraktori
18	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, hakkuu palstalle kasoihin + pieni laahusjuontotraktori
19	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu palstalle kasoihin + Normetin kasusalaite + kuormatraktori
20	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, hakkuu palstalle kasoihin + Normetin kasusalaite + kuormatraktori
21	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, Leka-menetelmä + Normetin kasusalaite + kuormatraktori
22	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu levälleen + Normetin kasusalaite + kuormatraktori
23	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, hakkuu levälleen + Normetin kasusalaite + kuormatraktori
24	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu levälleen + esikasustraktori + kuormatraktori
25	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, hakkuu levälleen + esikasustraktori + kuormatraktori
26	x	x	x	x	- - - , noin 3 m, hakkuu levälleen + liukupuomikuormatraktori
27	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, hakkuu levälleen + liukupuomikuormatraktori
28	x	x	x	x	- - - , noin 5 m, suorinta + kuormatraktori
29	x	x	x	x	Suunnattu kaato + keskisuuri prosessori, hakkuu palstalle kasoihin + kuormatraktori
30	x	x	x	x	- - - + iso prosessori, hakkuu palstalle kasoihin + kuormatraktori
31	x	x	x	x	- - - + vintturilla varustettu maataloustraktori + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
32	x	x	x	x	- - - + vintturilla varustettu maataloustraktori + iso prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
33	x	x	x	x	- - - + erillisevintturi + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
34	x	x	x	x	- - - + erillisevintturi + iso prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
35	x	x	x	x	- - - + Normetin kasusalaite + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
36	x	x	x	x	- - - + Normetin kasusalaite + iso prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
37	x	x	x	x	- - - + esikasustraktori + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
38	x	x	x	x	- - - + esikasustraktori + iso prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
39	x	x	x	x	- - - + liukupuomiprosessori + kuormatraktori
40	x	x	x	x	Pieni kaato-kasauskone + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
41	x	x	x	x	- - - + iso prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
42	x	x	x	x	Iso kaato-kasauskone + keskisuuri prosessori, hakkuu ajouran varteen + kuormatraktori
43	x	x	x	x	Kaato-juontokone + pieni prosessori varustolla
44	x	x	x	x	- - - + iso prosessori varustolla
45	x	x	x	x	Pitkäpuomiharvesteri 1 + kuormatraktori
46	x	x	x	x	- - - 2 + kuormatraktori
47	x	x	x	x	Keskisuuri harvesteri + kuormatraktori
48	x	x	x	x	Suuri harvesteri + kuormatraktori

SAHAPUUN OPTIMAALISEN KORJUUMENETELMÄN VALINTA

Esko Mikkonen

Lineaarisen ohjelmoinnin herkkyysohjelmoinnosta, parametrinen ohjelmointia, on tässä tutkimuksessa käytetty sahapuun optimaalisen korjuumenetelmäyhdistelmän valintaan. Tutkimuksessa mukana olleet viisi korjuumenetelmää ovat ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä, prosessorimenetelmä, ihmistyövaltainen runkomenetelmä ja täysin koneellistettu runkomenetelmä. Olosuhteissa, joissa ei tarkalleen tiedetä käytetyn korjuumenetelmän vaikutusta saatavan sahatavaran arvoon, voidaan raja-arvojen löytämiseksi käyttää parametrinen ohjelmoinnin keinoja. Jos sahatavaran arvo on riippumaton käytetystä korjuumenetelmästä, on tämän tutkimuksen olettamusten vallitessa edullista käyttää runkomenetelmää. Jos tavaralajimenetelmän korjuukustannukset ovat vähintään 14,85 mk/m³ edullisemmat kuin runkomenetelmän korjuukustannukset, runkomenetelmää ei Etelä-Suomen olosuhteissa kannata lainkaan käyttää sahapuun korjuuseen. Tuloksia ei kuitenkaan voida yleistää, sillä jokaisen sahan puunhankinta muodostaa oman erillisen kokonaisuutensa. Tätä tutkimusta varten kehitettyä menetelmää voidaan käyttää jokaisen erityistapauksen ratkaisemiseen.

SISÄLLYS

1 ONGELMAN KUVAUS	69
2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA LAAJUUS	70
3 KIRJALLISUUSKATSAUS	71
4 MALLIN MUOTOILU	73
4.1 Teoreettisia perusteita	73
4.1.1 Lineaarinen ohjelmointi	73
4.1.2 Herkkyysanalyysi	73
4.1.3 Parametrinen ohjelmointi	74
4.2 Teorian soveltaminen ongelmaan	75
4.2.1 Yleistä	75
4.2.2 Tutkimuksen korjuumenetelmät	75
4.2.3 Teoreettisen koejärjestelyn oletukset	76
4.3 Tavoitefunktio	77
4.4 Teknisten kertoimien perustiedot	77
4.4.1 Korjuuvauriot	77
4.4.2 Ihmistyöpanos ja ihmistyön kustannukset	77
4.4.3 Konetyöpanos ja konekustannukset	78
4.4.4 Pääomapanos	80
4.4.5 Rajahtovektorit	80
5 MALLIN ANTAMAT TULOKSET	81
5.1 Nollavaihtoehdon optimaaliset korjuumenetelmät	81
5.2 Tavoitefunktion kertoimien muutoksen vaikutukset	81
5.3 Rajahtovektorin muutosten vaikutukset	85
5.4 Laskennallisia kokemuksia	86
6 OPTIMAALISEN KORJUUMENETELMÄN VALINTA	87
6.1 Parametrisen lähestymistavan vaikutukset	87
6.2 Ratkaisun herkkyuden tarkastelu	87
7 PÄÄTELMÄT	88
7.1 Tutkimuksen suuntaaminen tulevaisuudessa	88
7.2 Tulosten hyödyntäminen	88
KIRJALLISUUSLUETTELO	89
LIITE	90

1 ONGELMAN KUVAUS

Sahapuun korjuu on Suomessa perinteisesti perustunut tavaralajimenetelmiin. Näitä menetelmiä käytettäessä hakkuumies kaataa, karsii ja katkoo sahatavararungot. Tukkien pituus määräytyy tavallisesti kyseisen rungon ominaisuuksien ja käytettyjen apteerausohjeiden mukaisesti. Vaikka puunkorjuun koneellistaminen on muuttanut käytettyjä korjuumenetelmiä, apteerausmenettely myös koneellisen korjuun yhteydessä on pysynyt samana; koneen käyttäjä arvioi rungon ja katkoo sen tukkeihin annettujen apteerausohjeiden mukaisesti. Valmiit tukit juonnetaan tienvarteen hydraulisella kourakuormaimella varustetulla kuormatraktorilla. Kaukokuljetus on tavallisesti tehty täysperävaunukuorma-autoilla. Edellä kuvatun apteerausmenettelyn mukainen jako tukkeihin on monessa tapauksessa aiheuttanut rungon jaon sahaajan kannalta epäoptimaalisiin pituuksiin. Viimeaikainen puutavaran mittaustekniikan nopea kehitys sahoilla yhdessä ajantasaisen automaattisen tietojenkäsittelyn kanssa mahdollistavat tukeista tai rungoista saatavan sahatavaran arvon maksimoinnin sahausprosessin kestäessä. Runkojen optimointi pitää sisällään myös rungon jakamisen optimaaliseksi tukeiksi. Kokorunkojen mittaaminen,

apteeraus ja katkonta tukeiksi voidaan suorittaa myös terminaalilla, josta tukit tavallisesti lähetetään sahalaitokselle.

Jos rungot voitaisiin jakaa optimaalisesti tukeiksi, on arvioitu, että rungosta saatavan sahatavaran arvo olisi 15–20 % suurempi kuin perinteisin menetelmin metsässä ei-optimaalisella tavalla apteeratun ja hakatun puutavaran arvo.

Tukkien ja runkojen käsittelymahdollisuuksien kehitys on herättänyt myös kysymyksen siitä, voitaisiinko kokonaisia puita tai runkoja kuljettaa sahalaitoksille tai keskiteytysti terminaaleille, joissa ne mitattaisiin ja jaettaisiin optimaalisella tavalla tukeiksi ja siten käytettäisiin hyväksi puun tai rungon arvo maksimaalisella tavalla. Tällaisesta menettelytavasta olisi tietenkin seurauksena raaka-aineen entistä parempi hyväksikäyttö.

Mittaus- ja optimointitekniikasta johtuu, että edeltävät korjuumenetelmät tulisi muuttaa kokopuu- tai runkomenetelmäksi. Tulisiikin suorittaa perusteellinen analyysi siitä, missä olosuhteissa runko- tai kokopuumenetelmät ovat käyttökelpoisia ja taloudellisia. Pitkällä aikavälillä tämä merkinnee, että sahapuun korjuuta varten on kehitettävä täysin uusia korjuuketjuja.

2 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET JA LAAJUUS

Tämän tutkimuksen tavoitteet ovat:

1. Luoda teoreettinen lineaarinen optimointimalli, joka kuvaa sahatavaran korjuumenetelmiä ja olosuhteita Suomessa.
2. Koota paras mahdollinen tieto, jota voidaan käyttää mallin parametrien arvoina. Käyttää luotua mallia sahatavaran parhaan korjuumenetelmäyhdistelmän valitsemiseen eri olosuhteissa ja täten antaa analyttinen työkalu päätöksentekijän käyttöön.
3. Käyttää luotua parametrin ohjelmoinnin lähestymistapaa karkealla tasolla ratkaisun herkkyyden tutkimiseen ja korjuumenetelmien kannattavuusrajojen määrittämiseen.

Malli rajataan sahapuun korjuun kannalta tyyppillisiin olosuhteisiin soveltuvaksi. Tämä merkitsee, että tarkasteluissa käytetään vain kolmea puun kokoluokkaa ja puuta kuljetaan jalostuslaitokselle enintään 120 km:n kuljetusetäisyydeltä. Muita kaukokuljetusmenetelmiä kuin täysperävaunu – kuorma-auto ei tässä tutkimuksessa tarkastella. Laskelmat suoritetaan kahdelle sahalaitoskoolle, 100 000 ja 500 000 m³ raakapuuta vuosittain käsitteleville sahalaitoksille. Varsinainen terminaalikäsitteily jätetään tämän käsittelyn ul-

kopuolelle. Sahalaitoksilla syntyvän hakkeen kaukokuljetusmatkaksi oletetaan enintään 50 km. Tutkimuksessa mukana olevien korjuu- ja kaukokuljetusmenetelmien lukumäärä rajataan viiteen; näistä kolme on tavaralajimenetelmiä ja kaksi runkomenetelmiä.

Infrastruktuuri ja puunhankintaorganisaatio, joka toteuttaa korjuun, oletetaan vakioiksi molemmissa menetelmätyypeissä. Tämä merkitsee, että tienrakennus-, hallinto- jne. kustannukset ovat menetelmätyypistä riippumattomat ja ne voidaan jättää tarkastelun ulkopuolelle vertailuja ja valintoja tehtäessä.

Tässä tutkimuksessa luodun mallin potentiaalisia käyttäjiä ovat sahalaitokset ja puunhankintaorganisaatiot, jotka voivat soveltaa sen antamia tuloksia olosuhteisiinsa ja helpottaa sen avulla päätöksentekoa. Muut tutkijat voivat käyttää luotua mallirakennetta samantyyppisten ongelmien ratkaisemiseen.

Ongelmakokonaisuuden ratkaisemiseen käytetään lähestymistapaa, jossa ensin kehitellään mallin teoreettiset perusteet ja sitten sovelletaan sitä käsillä olevaan ongelmaan ja lopuksi esitetään kokeiluratkaisujen tulokset sekä mallin kritiikki.

3 KIRJALLISUUSKATSAUS

Runkomenetelmien käyttömahdollisuuksia Suomen olosuhteissa on tarkastellut Salminen (1979). Hän luettelee joukon etuja, joita runkomenetelmillä on tavaralajimenetelmään verrattuna ja mainitsee myös joitakin menetelmän heikkouksia. Hän näkee etuina seuraavat seikat:

- Puuraaka-aineen hyväksikäyttö on parempi.
- Runko voidaan jakaa optimaalisesti puutavaralajeiksi.
- Erikoistoimitukset ovat mahdollisia.
- Puunkorjuukoneet yksinkertaistuvat ja halpenevat.
- Työvoiman tarve on selvästi alhaisempi kuin tavaralajimenetelmissä.

Runkomenetelmiin siirtymisen epäkohtina Salminen mainitsee suuret investointikustannukset sahalla tai käsittelyasemalla sijaitseviin puunkäsittelylaitteisiin. Puunkäsittelyteknologia, jota muualla käytetään, ei sellaisenaan sovellu Suomen olosuhteisiin, vaan sitä täytyy edelleen kehittää vastaamaan nykyajan vaatimuksia. Muina epäkohtina hän näkee, että käyttöön tulisi kaksi erillistä korjuumenetelmää, jotka toimivat eri periaatteen mukaan; toisella menetelmällä korjattaisiin sahapuu ja toisella kuitupuu. Tämä lisäisi puunkorjuun konekustannuksia ja sitä kautta korjuun yksikkökustannuksia. Latvakuitupuun käsittely kokopuu- tai runkomenetelmissä aiheuttaisi ylimääräisiä kustannuksia. Salminen ei anna suoranaisia kustannuslukuja siitä, kuinka paljon suuremmat tai alhaisemmat runkomenetelmän kustannukset saisivat olla, jotta se olisi taloudellisesti mielekäs tai sallittava verrattuna tavaralajimenetelmiin. Loppupäätelmänä hän sanoo: ”Runkomenetelmää ei voida pitää Suomen olosuhteissa yleisratkaisuna. Sen käyttöönotto on järkevää vain pienillä sahoilla tai osittaisratkaisuna myös suuremmilla sahalaitoksilla, jos onnistutaan ratkaisemaan kannattavasti ostajien erikoispuutavaralajivaatimukset ja nopeat toimitusajat.”

Skogsarbetenissa Ruotsissa (Larsson ja Nilsson 1977) on suoritettu laajahko tutkimus, jossa koneellista tavaralajimenetelmää

verrattiin runkomenetelmään. Tässä tutkimuksen päävaihtoehdossa rungon jakaminen tukeiksi tapahtui kaukokuljetusreitien varressa ja toisessa kokorunkojen autokuljetuksen jälkeen terminaalilla. Tarkasteltiin useita terminaalikojoja ja sijaintipaikkoja. Vertailut tehtiin rahana mitattavilla kustannusluvuilla, joten eri menetelmien suorat vertailut ovat mahdollisia. Kun näihin numeroihin jäljempänä viitataan, ne on muutettu suhteelliseksi, jotta päästäisiin eroon rahan arvon vaihtelun aiheuttamasta harhasta. Tämä tutkimus osoitti, että tavaralajimenetelmät olivat kaikkein edullisimmat. Kokonaiskuljetuskustannukset olivat 10 % suuremmat vaihtoehdossa, jossa puutavara apteerattiin tienvarressa, ja 25–40 % suuremmat muissa vaihtoehdoissa perinteisiin menetelmiin verrattuna. Runkomenetelmien pelkät korjuukustannukset olivat 15 % pienemmät, mutta kaukokuljetuskustannukset vastaavasti 23 % suuremmat. Käsittelyaseman kustannukset on lisättävä runkomenetelmien kustannuksiin ja niiden osuudet olivat 38, 26 ja 22 %. Suuremmat kaukokuljetuskustannukset runkomenetelmien osalta aiheutuvat pienemmistä kuormista, jotka puolestaan johtuvat käytetystä lastaustekniikasta. Jos sekä runko- että tavaralajimenetelmillä voitaisiin kuljettaa yhtä suuret kuormat, kaukokuljetuskustannukset olisivat suurin piirtein yhtä suuret. Viimeisimpien laskelmien mukaan runkomenetelmällä tapahtuvan korjuun ja kaukokuljetuksen yhteiskustannukset olisivat 3–10 % alhaisemmat kuin tavaralajimenetelmän vastaavat kustannukset. Loppupäätelmänä ruotsalaiset esittävät, että runkomenetelmällä korjattavien puiden arvon olisi oltava 1,3–6,5 % suurempi kuin tavaralajimenetelmällä, jotta runkomenetelmät olisivat taloudellisesti perusteltavissa.

Mainittua tutkimusta voidaan kritikoida siitä, että siinä tarkastellaan vain yhtä kuljetusetäisyyttä (60 km) ja että leimikkotyypivalikoima on pieni. Optimaalisia korjuumenetelmiä ei käytetä eri olosuhteissa vaan oletetaan kaavamaisesti, että samoja korjuume-

netelmiä käytetään erilaisissa vaihtelevissa olosuhteissa.

Granquistin (1977) julkaisemassa toisessa ruotsalaisessa tutkimuksessa kokopuumenetelmiä verrattiin prosessori- ja harvesterimenetelmiin. Molemmissa menetelmissä tukkien kaukokuljetus tapahtui kuorma-autoilla. Granquistin mukaan korjuu runkometelmillä ja kaukokuljetus olivat sinänsä kalliimpia kuin korjuu tavaralajimenetelmillä niissä menetelmissä, joita tutkimus koski. Toisaalta runkometelmillä korjatut puut antoivat enemmän sahatavaraa vähempien tukeille aiheutettujen vaurioiden johdosta. Päättelmä oli, että tutkimusten olosuhteissa korjuu runkometelmillä oli houkutteleva vaihtoehto.

Runkojuontoa on Suomessa tutkinut Thesslund (1979) Lokomo 961 T -runkoharvesterin yhteydessä. Tutkimuksen tulokset osoittivat, että runkoina korjuu olisi noin 5 mk/m³ halvempaa kuin korjuu tavaralajimenetelmillä prosessoriin perustuvissa korjuuketjuissa.

Kirjallisuuden perusteella on todettava, että runko- ja kokopuumenetelmäkorjuuta ja kaukokuljetusta koskeva tutkimus on viime vuosina ollut aika laajaa eri puolilla maail-

maa. Nämä tulokset eivät kuitenkaan ole suoraan sovellettavissa Suomen olosuhteisiin johtuen erilaisesta infrastruktuurista.

Tilghman (1967) käytti lineaarista ohjelmointia integroidun metsäteollisuusyrityksen puun hankintakustannusten minimointiin. Eskelinen ja Peltonen (1977) käyttivät lineaarista ohjelmointia raakapuuväestöjen optimikoon määrittämiseen. Simulointia on käytetty vaihtoehtoisten puunhankintatapojen arviointiin (Simpson 1970).

Parametrinen ohjelmointia ei tähän mennessä ole käytetty tässä tutkimuksessa esitettyssä muodossa optimaalisten korjuu- ja kuljetusmenetelmien löytämiseen ja arviointiin.

Tähänastiset kirjallisuudesta löytyvät runko- ja tavaralajimenetelmien vertailututkimukset koskevat erityisolosuhteita. Näiden tuloksista on sitten pyritty johtamaan yleisempiä päätelmiä kunkin menetelmän soveltuvuudesta. Vaikka tutkimukset ovat olleet aika monipuolisia ja laajoja, käytetty menetelmä ei ole kyennyt osoittamaan optimaalista korjuumenetelmää eri olosuhteisiin. Käsillä olevassa tutkimuksessa kehitetään kvantitatiivinen lähestymistapa edellä kuvattujen ongelmien ratkaisemiseksi.

4 MALLIN MUOTOILU

4.1 Teoreettisia perusteita

4.1.1 Lineaarinen ohjelmointi

Lineaarinen ohjelmointi on matemaattinen optimointimenetelmä, jonka avulla niukkoja resursseja kohdennetaan eri toiminnoille sillä tavalla, että joku tavoitefunktio optimoituu tiettyjen rajoitusehtojen ollessa voimassa. Lineaarisen optimoinnin ongelma voidaan esittää kätevästi matriisimuodossa seuraavalla tavalla.

$$\begin{aligned} \text{Max } Z &= \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{kun } \mathbf{A}\mathbf{x} &= \mathbf{b} \\ \mathbf{x} &\geq \mathbf{0} \end{aligned} \quad (1)$$

Kaavassa vektori \mathbf{c}^T = kustannusten tai tuottojen rivivektori, \mathbf{x} = muuttujien sarakevektori ja \mathbf{A} = teknisten kertoimien matriisi sekä \mathbf{b} = oikean puolen rajahtosarakevektori, joka muodostaa ongelman raja-avaruuden. \mathbf{x} :n arvojen oletetaan olevan ei-negatiivisia. Esitettyssä muodossaan \mathbf{x} -vektori sisältää apumuuttujat, joita käytetään ongelman ratkaisemisen apuna.

Yllä esitetyn lineaarisen ongelman ratkaisu tuottaa seuraavan tuloksen (Zionts 1974, s. 50–57) esitetynä matriisimuodossa.

$$\mathbf{x}^*_B = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}; \quad Z^* = \mathbf{c}_B^T \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} \quad (2)$$

Kaavassa \mathbf{x}^*_B on sarakevektori, joka sisältää muuttujien (aktiiviteettien) optimaalisen ja käyvän kantaratkaisun. $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}^{-1}$ on \mathbf{A} -matriisin tiettyyn järjestykseen asetettujen kantamuuttujien kerrointen käänteismatriisi ja \mathbf{b} on sama kuin edellä on esitetty. \mathbf{c}_B^T on alkupe- räisen tavoitefunktion kannassa olevien muuttujien kerroinvektori ja Z^* on tavoitefunktion arvo optimaalisessa ratkaisussa (minimi tai maksimi). Tässä yhteydessä tarkemmin esittelemättä jätettävä simplex-algoritmi tuottaa optimaalisen kantaratkaisun mihin tahansa lineaarisen optimoinnin ongelmaan, jos sellainen ratkaisu ylipäätään on olemassa.

4.1.2 Herkkyysanalyysi

Kun yllä kuvattu lineaariongelma on ratkaistu, todellinen ongelma, jota asianomaisella mallilla on kuvattu, on tavallisesti vasta puoliksi ratkaistu. Tämä siksi, että lineaarimallin alkuolettamuksena ovat deterministiset parametrien arvot (mallien kertoimet). Näinhän tilanne useimmissa tapauksissa ei ole, sillä ongelmaan liittyy aina epätarkkuutta. Mallissa voi nimittäin esiintyä kolmenlaista epätarkkuutta: 1) tavoitefunktion kertoimiin (\mathbf{c}^T -vektori) liittyvät epävarmuustekijät, 2) rajahtovektorin arvoihin (\mathbf{b} -vektori) ja 3) \mathbf{A} -matriisin kertoimiin liittyvät epävarmuustekijät. Herkkyysanalyysi, jota kutsutaan joskus myös jälkianalyysiksi, on joukko laskentamenetelmiä, joilla tätä ongelmaa pyritään ratkomaan.

Yksinkertaisessa herkkyysanalyysissä oletetaan, että parametrien arvoja tutkitaan yksi kerrallaan pitäen muut arvot vakiona. Tällainen herkkyysanalyysi vastaa kysymykseen, kuinka paljon vaihtelua kukin yksittäinen parametri voi sisältää kantaratkaisun pysyessä muuttumattomana.

Matemaattisesti voidaan tavoitefunktion kerrointen muutokset esittää seuraavasti (Simmons 1972):

$$\text{Max } Z = (\mathbf{c} + \theta^{(1)}\mathbf{s})^T \mathbf{x} \quad (3)$$

jossa θ on ei-negatiivinen skalaariparametri, joka määrittää arvot, joilla vektori \mathbf{x}_B on optimaalinen, \mathbf{s} on n -komponenttivektori, joka sisältää tarkasteltavina olevat muuttujat. Tapauksissa, joissa vain yhtä vektorin \mathbf{c} kerrointa tarkastellaan, \mathbf{s} on yksikkövektori, joka liittyy tarkasteltavaan muuttuajaan.

Kun ongelma ratkaistaan (Simmons 1972, s. 220–230) saadaan

$$\theta^{(1)} \leq \frac{-(z_j - c_j)}{s_{Bj}^T - s_j} \quad (4)$$

jossa $(z_j - c_j) = j$:n muuttujan kustannusmuutos.

Kaava kertoo, että \mathbf{x}_B on optimaalinen niin kauan kun $\theta^{(1)}$ on riittävän pieni, jotta esitetty epäyhtälö on voimassa.

Jotta oikean puolen rajahtovektoria voitaisiin tutkia, on tehtävä seuraavat muutokset. Olkoon $\mathbf{b} = \mathbf{b} + \emptyset \mathbf{e}_j$, silloin ratkaisu on optimaalinen niin kauan kuin

$$\begin{aligned} \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{b} + \emptyset \mathbf{e}_j) &\geq 0 \\ \text{tai} \\ \mathbf{B}^{-1}\mathbf{b} + \emptyset \mathbf{B}^{-1}\mathbf{e}_j &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Olkoon $\mathbf{B}^{-1}\mathbf{e}_j = \mathbf{u}_j$ optimaalisen ratkaisun kääntematriisiin se sarake, joka sisältää oikean puolen vektorin arvot. Kun se ratkaisuun \emptyset :n suhteen, saadaan

$$\emptyset = \min \left(\frac{-x_{Bj}}{u_j}, u_j < 0 \right) \quad (6)$$

joka ilmoittaa optimaalisen ratkaisun rajat kannassa olevien rajahtovektoreiden arvojen suhteen. Esitettyä laskentatapaa hyväksikäyttäen voidaan kullekin rajoitusyhtälölle laskea vaihteluväli optimaalisessa ratkaisussa.

4.1.3 Parametrinen ohjelmointi

Koska tässä tutkimuksessa pääpaino on tavoitefunktion kertoimien tutkimisessa ja niiden muutoksien vaihtelun vaikutuksesta optimaaliseen kantaratkaisuun, vain tämä parametrinen ohjelmointi keino esitellään. Ongelmana siis oli löytää $\theta^{(k)}$:n peräkkäiset arvot, joilla optimaalinen kantaratkaisu muuttuu. Näitä arvoja sanotaan kriittisiksi arvoiksi ja niiden muutokset mitataan nollasta alkaen. Laskenta lähtee liikkeelle simplex-algoritmin optimaalisesta taulukosta siten, että

$$\theta^{(k)} = 0, \theta^{(k)} = \alpha \text{ ja } \theta^{(k)} = \beta$$

α ja β ovat kaksi peräkkäistä kriittistä arvoa siten, että $(\beta \geq \alpha)$. Optimaalinen ratkaisu on tunnettu ja sen ilmoittaa vektori ${}^a\mathbf{x}_B$. Vaihteluväli, jolla ${}^a\mathbf{x}_B$ on optimaalinen, saadaan kaavasta (4). Seuraavan kriittisen arvon laskemiseen käytetään kaavaa (Taha 1972 s. 286–300).

$$\beta = \alpha + \min \left\{ \frac{-(a_{z_1} - a_{c_1})}{(s_B {}^a\mathbf{B}^{-1}\mathbf{b}_j - s_j) < 0} \right\} \quad (7)$$

kun $\theta^{(k)} > \beta$, ${}^a\mathbf{x}_B$ ei enää ole optimaalinen.

Pisteessä, jossa $\theta^{(k)} = \beta$, löytyy vaihtoehtoinen optimaalinen ratkaisu. Laskentarutiini toistetaan, jotta saataisiin uusi kantaratkaisun vaihteluväli, ${}^{\beta}\mathbf{x}_B$ ja myös seuraava kriittinen arvo. Tämä toistetaan peräkkäin niin monta kertaa, kunnes $\theta^{(k)}$ saavuttaa sellaisen arvon, että sitä voidaan kasvattaa äärettömiin muuttamatta optimaalista kantaratkaisua.

Koska käytössä ei ollut tietokoneohjelmaa, joka olisi suoraan pystynyt laskemaan peräkkäiset kriittiset arvot, käytettiin seuraavaa karkeaa lähestymistapaa. Kertoimien arvoja muutettiin tietyllä määrällä ja katsottiin, miten kantaratkaisu ja sen herkkyysanalyysin antamat rajat muuttuivat, kun uudet kertoimet asetettiin tavoitefunktion. Näitä tarkastelemalla löydettiin ne rajat, joiden puitteissa kukin kantaratkaisu oli optimaalinen.

Seuraavasta esimerkistä käy ilmi, miten lähestymistapa toimii.

Aluksi oletettiin sahatukkien arvon olevan tavoitefunktiossa sama menetelmästä riippumatta. Tämä tarkoittaa, että tavoitefunktion arvokertoimet ovat korjuumenetelmittäin samat. Ratkaisualgoritmi antoi optimaaliset korjuumenetelmät ja tavoitefunktion kerrointen vaihteluvälin, jolla asianomainen ratkaisu säilyy optimaalisena. Seuraavassa vaiheessa runkomenetelmien kustannuskertoimia muutettiin (aluksi laskettiin, myöhemmin myös korotettiin) ja yllä kuvattu laskentamenetelmä toistettiin.

Tuloksia verrattiin edellisen laskennan tuloksiin käyttöön tulleiden korjuumenetelmämuutosten havaitsemiseksi. Jos korjuumenetelmässä oli tapahtunut muutosta tutkittiin, millä tarkalla määrällä kustannuskertoimia oli muutettava, jotta käyttöön tulleet korjuumenetelmät vaihtuisivat. Jos muutosta ei ollut tapahtunut, kustannuskertoimia muutettiin edelleen 5 mk:lilla ja yllä kuvattu laskentamenetelmä toistettiin. Tämä toistettiin niin monta kertaa kuin oli tarpeen runkomenetelmien saamiseksi pois kantaratkaisusta. Samoin menetettiin tavaralajimenetelmien osalta.

Toisena syynä tällaisen lähestymistavan käyttöön on se, että useat tavoitefunktion kertoimet muuttuvat samalla, kun puutavaran arvo muuttuu. Käytettävissä olleella lineaarisen ohjelmoinnin tietokoneohjelmistolla ei ollut mahdollista tarkastella samanaikaisia muutoksia useissa tavoitefunktion kertoimis-

sa, joten käytetty menettelytapa oli perusteltu.

Kolmantena syynä käytetyn menettelytavan valitsemiselle oli se, että tarkasteltiin vain kahta päätyypiltään toisistaan poikkeavaa korjuumenetelmää, joskin kunkin menetelmän sisällä oli useita erilaisia vaihtoehtoja. Käytetty karkea lähestymistapa antaa kuitenkin riittävän tarkat tulokset vertailujen suorittamiseksi päämenetelmien kesken.

4.2 Teorian soveltaminen ongelmaan

4.2.1 Yleistä

Puunkorjuun ja kuljetuksen menetelmien valintaongelma voidaan muotoilla lineaarisen ohjelmoinnin ongelmaksi. Tässä tapauksessa ongelmana on valita korjuumenetelmä tai korjuumenetelmien yhdistelmä, jonka tuloksena puuraaka-aineesta saatava tuotto maksimoituu eri olosuhteissa. Ratkaisun tulisi myös antaa kullakin korjuumenetelmällä korjattava optimaalinen puutavaramäärä. Olkoot

$$x_{ijk} \text{ ja } y_{ijk}$$

kuutiomäärät, jotka korjataan päämenetelmillä. x_i tarkoittaa tavaralajimenetelmiä ja y_i tarkoittaa vastaavasti runkomenetelmiä. Alaviite j tarkoittaa rungon kokoluokkaa ja alaviite k kuljetusetäisyyttä. Kuten jo aikaisemmin on käynyt ilmi, tarkastelun kohteena on kolme eri puun kokoluokkaa ja kuljetusetäisyyttä. Indeksointi toimii kuten seuraavassa asetelmassa on esitetty.

j	Puun keskikoko, m ³	k	Etäisyys, km (keskim.)
1	0,225	1	0–35 km (20 km)
2	0,325	2	36–65 km (50 km)
3	0,550	3	66–120 km (90 km)

Esimerkiksi x_{332} on Pika 75 -harvesterimenetelmä, jolla korjataan suurimman kokoluokan puita (0,55 m³/runko) keskimäärin 50 km:n kuljetusetäisyydeltä.

Eri korjuumenetelmien käyttöä rajoittavat useat tekijät. Seuraavat rajoitukset otettiin huomioon:

- Korjattava kokonaisuusmäärä luokiteltuna
- puukokoluokittain
- kuljetusetäisyyksittäin
- ihmistyöpanos
- konetyöpanos
- investointivarat

Runkojen ja tukkien laatutekijät

- mekaaniset vauriot
- sinistymävauriot
- hyönteisvauriot

Tukkien arvon aleneminen epäoptimaalisen apteeruksen johdosta

Varastotilavaatimukset

Jotta päämenetelmien vertailut voitiin tehdä yhtenevältä pohjalta, käytettiin seuraavia alkuolettamuksia.

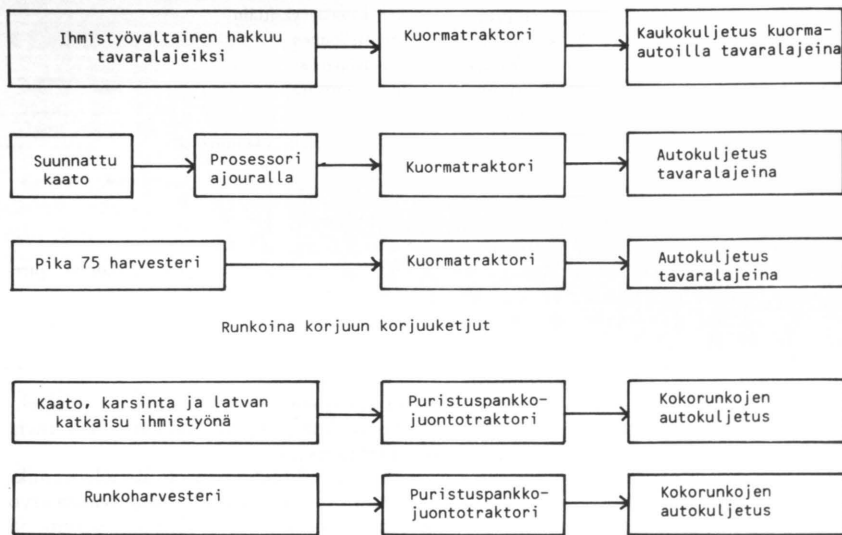
Ns. nollavaihtoehdossa oli alkuolettamuksena, että tukeista saatavan sahatavaran arvo on sama riippumatta siitä, mitä korjuu- ja kuljetusmenetelmää käytetään. Eri vaihtoehdot luotiin siten, että runkomenetelmällä korjattavien tukkien arvoa muutettiin suhteessa tavaralajimenetelmillä korjattujen tukkien arvoihin. Näitä vaihtoehtoja kutsutaan vaihtoehtoiksi –30, –20, –10 tai vaihtoehtoiksi +5, +10, +20 jne. Vaihtoehto-sanalla jäljessä oleva luku ilmoittaa, kuinka paljon sahatavaran arvon on oletettu poikkeavan nollavaihtoehdon vertailuvuorosta runkomenetelmällä saatujen tukkien osalta.

4.2.2 Tutkimuksen korjuumenetelmät

Tutkimukseen mukaan tulleet korjuu- ja kuljetusmenetelmät valittiin niiden potentiaalisen käyttökelpoisuuden perusteella; jokainen tavaralajimenetelmä, jota tarkasteltiin, on osoittautunut luotettavaksi, mutta sitä ei ole vielä käytetty siinä laajuudessa kuin sitä voitaisiin käyttää lukuun ottamatta ihmistyövaltaista tavaralajikorjuuta, joka on yleisin käytössä oleva korjuumenetelmä tänä päivänä.

Ihmistyövaltaiset runkomenetelmät ovat osoittautuneet toimiviksi muualla maailmassa ja täysin koneellistettu runkomenetelmä on valittu siksi, että siihen on olemassa luotetta-

Tavaralajikorjuun korjuuketjut



Kuva 1. Tutkimuksen korjuu- ja kuljetusmenetelmät.

vat koneet. Tarkastellut korjuumenetelmät on esitetty kuvassa 1.

4.2.3 Teoreettisen koejärjestelyn oletukset

Runkomenetelmät eivät voi koskaan tulla Suomessa valtamenetelmiksi johtuen suuresta yksityisten metsänomistajien määrästä ja metsän erilaisista hakkuutavoista, kuten Salminen (1979) asian ilmaisee: "Suomen oloissa runkoina hankintaa ei voida pitää yleisratkaisuna. Sen soveltaminen tulee kysymykseen lähinnä pienillä sahalaiteksilla tai osaratkaisuna suurillakin sahalaiteksilla, jos tuotteiden ostajien erikoismittojen tai nopeiden toimitusten markkinointi pystytään kannattavasti ratkaisemaan." Tämän johdosta tarkasteltiin kahta sahalaitekokoa, nimittäin 100 000 ja 500 000 m³ tukkeja vuosittain käytäviä laiteksia. Ensimmäinen edustaa pienehköä sahalaitea ja jälkimmäinen voidaan luokitella suureksi. Molempien laiteksien oletetaan sijaitsevan Etelä-Suomessa, jota aluetta myöhemmin esitettävien laskelmien kustannukset näin ollen koskevat. Yksinkertaisuuden vuoksi on myös oletettu, että kaikki

toiminnot (ts. puunkorjuu, metsäkuljetus ja kaukokuljetus) suoritetaan kesäaikaisissa olosuhteissa. Aikajänne, jonka kuluessa kukin yksittäinen korjuu- tai kuljetusoperaatio suoritetaan, oletetaan enintään kahden kuukauden mittaiseksi. Ne oletetaan myös yhden jakson operaatioiksi ja näin ollen mitään varastoja korjuu- ja kuljetustoiminnon välissä ei tarkastella. Laskelmat sekä kustannusten että päämäärien osalta on suoritettu vuositasolla.

Pienen sahalaiteksen osalta on edelleen oletettu seuraavat lisärajoitukset:

- Enintään 20 % puumäärästä voidaan saada suurimmasta puukokoluokasta.
- Enintään 50 % puumäärästä voidaan saada keskikokoisesta puukokoluokasta.
- Enintään 30 % puumäärästä on saatavissa 35 km:n kuljetusetäisyydeltä.
- Enintään 40 % puumäärästä on saatavissa 65 km:n kuljetusetäisyydeltä.

Muut rajoitukset ovat:

- Työllistettävä 2 kuormatraktoria (1 440 h/vuosi)
- Työllistettävä 9 vakinaista hakkuumiestä (220 päivää/vuosi)
- Muita rajoituksia nollavaihtoehdossa ei käytetä.

Vastaavat oletukset suuren sahalaiteksen osalta ovat:

- Vähimmäisraaka-ainemäärä luokiteltuna puun koon ja kuljetusetäisyyden mukaan on seuraava.

Etäisyys	0,225	Puun koko, m ³	
		0,325	0,550
		% kuutiomäärästä	
0- 35	>2	> 6	>3
36- 65	>4	>12	>6
66-120	>4	>12	>6

- Enintään 30 % kuutiomäärästä on saatavissa suurimmasta rungonkokoluokasta.
- Enintään 70 % kuutiomäärästä on saatavissa toiseksi suurimmasta kokoluokasta.
- Enintään 20 % kuutiomäärästä on saatavissa 35 km:n kuljetusetäisyydeltä.
- Enintään 60 % on saatavissa 65 km:n kuljetusetäisyydeltä.

Muut suurta sahalaitea koskevat rajoitukset:

- 10 kuormatraktoria on työllistettävä (1 440 h/vuosi).
- 70 vakinaista hakkuumiestä on työllistettävä (220 päivää/vuosi).
- Ei muita rajoituksia.

4.3 Tavoitefunktio

Metsätilastollisen vuosikirjan (1979) mukaan jokaisesta sahatavarakuutiometristä saadaan 560 markan tulot. Jokainen sahatarakuutiometri toisaalta vaatii 2,15 kiintom³ sahatukkeja. Täten jokaisen raakapuun³:n generoima tulo on 260 markkaa.

Sahan kannalta katsottuna kuitupuun ja hake, jota myös saadaan, kun sahatukkeja hankitaan, on sivutuote. Kuitupuun arvona on laskelmissa näin ollen käytetty 80 mk/m³, sillä sahalaiteksen on myytävä se edelleen ja tämä on kuitupuun kyseisen ajankohdan kuutiometrihintaa. Käytetyt tavoitefunktion kertoimet on esitetty taulukossa 1 luokiteltuna ja laskettuna tukkisäilytyksen ja korjuumenetelmän mukaan.

Runkomenetelmällä korjatun puutavaran tukkiosuudet on oletettu jossain määrin suuremmiksi kuin tukkiosuudet tavanomaisissa tavaralajimenetelmissä. Jotta todelliset netto-

Taulukko 1. Käytetyt raaka-aineen arvot.

Puutavaralaji	0,225 m ³		0,325 m ³		0,550 m ³	
	%	mk/m ³	%	mk/m ³	%	mk/m ³
Tavaralajimenetelmät						
Tukit	52	135	76	198	82	213
Kuitupuun	48	39	24	19	18	15
Yhteensä	100	174	100	217	100	228
Runkomenetelmät						
Tukit	57	148	82	213	86	224
Kuitupuun	43	37	18	15	14	11
Yhteensä	100	185	100	228	100	235

tulot voitaisiin laskea, on tavoitefunktion arvosta vähennettävä hakkuun, metsäkuljetuksen ja kaukokuljetuksen kustannukset sekä eri korjuumenetelmien aiheuttama vaurioiden arvo. Nollavaihtoehdon tavoitefunktio pienen sahalaiteksen osalta on esitetty liitteessä 1 (s. 90-93).

4.4 Teknisten kertoimien perustiedot

4.4.1 Korjuuvauriot

Taulukossa 2 esitetyt luvut mekaanisten vaurioiden, sinistymän ja hyönteisten aiheuttamien vaurioiden arvosta perustuvat perustuvat Mäkelän ja Pennasen (1980) esittämiin prosenttilukuihin. Näitä arvoja on käytetty teknisinä kertoimina ja niiden avulla on laskettu tavoitefunktion kustannusvaikutukset.

Tavaralajimenetelmissä on puuraaka-aineelle käytetty alhaisempia arvoja, jotka johtuvat epäoptimaalisesta rungon apteerauksesta tukeiksi. Laskelmat perustuvat Eskelisen ja Pennasen (1979) antamiin lukuihin. Ne ovat seuraavat: Ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä 2,61 mk/m³, prosessoriin perustuvat menetelmät 3,96 mk/m³ ja Pika 75 -harvesteriin perustuvat menetelmät 4,22 mk/m³.

4.4.2 Ihmistyöpanos ja ihmistyön kustannukset

Jokainen tarkasteltu korjuumenetelmä vaatii tietyn ihmistyöpanoksen hakkuun, metsäkuljetuksen ja kaukokuljetuksen eri vai-

Taulukko 2. Mekaanisten korjuuvaurioiden, sinistymän ja hyönteisten aiheuttama sahatukkien arvon aleneminen Eskelisen ja Pennasen mukaan (1979).

Menetelmä	Arvon aleneminen, %		Puun koko, m ³	
	0,225	0,325	0,325	0,550
	Aleneminen, mk/m ³			
Mekaanisten vaurioiden aiheuttama arvon lasku				
(1) Tavaralajimenetelmä-korjuu	0,3	0,41	0,59	0,64
(2) Prosessorikorjuu	1,6	2,16	3,16	3,41
(3) Pika 75-harvesterikorjuu	0,1	0,14	0,20	0,21
(4) Ihmistyövaltainen runkomenetelmä	0,1	0,15	0,21	0,22
(5) Runkoharvesterikorjuu	0,7	1,04	1,49	1,57
Sinistymän aiheuttama arvon lasku				
(1) Tavaralajimenetelmä-korjuu	1,3	1,76	2,57	2,77
(2) Prosessorikorjuu	0,7	0,95	1,38	1,49
(3) Pika 75-harvesterikorjuu	0,7	0,95	1,38	1,49
(4) Ihmistyövaltainen runkomenetelmä	1,3	1,93	2,77	2,91
(5) Runkoharvesterikorjuu	0,1	0,15	0,21	0,22
Hyönteisten aiheuttama arvon lasku				
(1) Tavaralajimenetelmä-korjuu	4,8	6,49	9,40	10,20
(2) Prosessorikorjuu	3,7	5,00	7,31	7,89
(3) Pika 75-harvesterikorjuu	2,7	3,65	5,34	5,76
(4) Ihmistyövaltainen runkomenetelmä	4,8	7,11	10,20	10,70
(5) Runkoharvesterikorjuu	3,6	5,34	7,68	8,05

heissa. Tämä työpanos riippuu korjuumenetelmän tuottavuudesta. Tuottavuudet, joita laskelmissa on käytetty, perustuvat toisaalta Kahalan (1969 ja 1979) tutkimuksiin ja toisaalta hakkuun ja metsäkuljetuksen maksuperustetutkimuksiin.

Todellisten kustannusten selville saamiseksi on lisättävä sosiaalikulut, jotka laskelmassa ovat noin 46 % työn kustannuksista.

Hakkuun kustannukset eri puutavaralajeille laskettiin palkkataulukoista (Metsä- ja uittoalan... 1979). Kun tiedetään hakkuun päivätuotos vastaavassa rungonkokuoluokassa, pystytään laskemaan tarvittava miestyöpanos m³:ä kohti.

4.4.3 Konetyöpanos ja konekustannukset

Metsäkuljetuksen tuotosluvut perustuvat uusimpiin Kahalan (1979) kuormatraktori-tutkimuksiin, koneellisen hakkuun osalta Mikkosen (1977) ja Myllyniemen (1977) prosessorin työskentelyä ajouralla koskeviin ja Mäkelän (1979) Pika 75 -harvesterin työskentelyä kuusikossa koskeviin tutkimuksiin. Runkoharvesterin tuotosluvut perustuvat Mikkosen ym. (1979) julkaisemiin tutkimuksiin. Käytetty konetyöpanoksen lukuarvo tietenkin on kuutiometrituotoksen käänteisluku asianomaisissa olosuhteissa.

Autokuljetuksen tuotosluvut on laskettu käyttäen Myllyniemen (1980) julkaisemia kuorma-aikojia ja seuraavia keskimääräisiä ajonopeuksia.

Kuljetusetäisyys	Keskinopeus, km/h
20 km	55
50 km	65
90 km	75

Laskelmiin implisiittisesti sisällytetyt koneiden käyttöasteet ja tuntikustannukset ovat

Kone	Käyttöaste, %	Tuntikustannukset, mk
Kuormatraktori	80	125
Prosessori	67	225
Pika 75 -harvesteri	65	260
Pankkojuontokone	63	278
Runkoharvesteri	65	350
Puutavara-auto	95	-

Laskelmien muut perusteet on esitetty taulukossa 3.

Metsäkuljetuksen osalta edelleen oletettiin, että kuormatraktorin tuotos on 6 % alhaisempi kuitupuun juonnossa verrattuna tukkien juontoon, ja tämä otettiin huomioon keskimääräistä tuotosta arvioitaessa. Metsätraktoriin tuotos monitoimikoneen jälkeen oletettiin tukkien juonnossa 10 % ja kuitupuun juonnossa 8 % ihmistyövaltaisen hakkuun jälkeistä tuotosta suuremmaksi.

Taulukko 3. Laskelmien perusteet. Leimikon tiheys 500 runkoa/ha.

Konetyyppi	Hankintahinta, mk	Jäännösarvo, %	Pitoaika		Vuosituotos keskim., m ³	Ihmistyökoneyösuhte	Rungon koko, m ³		
			tuntia	vuotta			0,225	0,325	0,550
Kuormatraktori	750 000	30	6 480	4,5	20 736	1,4	11,5	11,5	11,5
Prosessori	1 200 000	25	7 500	5,0	40 725	1,7	21,0	27,5	42,0
Pika 75 -harvesteri	1 100 000	20	6 875	5,0	18 500	1,7	9,7	13,5	20,3
Pankkojuontokone	850 000	20	7 050	5,0	25 400	1,4	15,0	17,4	23,9
Runkoharvesteri	1 500 000	20	11 150	5,0	80 600	1,7	27,1	36,6	55,1
							Kuljetusetäisyys		
							20 km	50 km	90 km
Kuorma-auto	450 000	22	9 975	5,0	38 335	1,5	28,7	21,9	17,5

Koneellisen hakkuun ja metsäkuljetuksen yksikkökustannukset on saatu suoraan voimassa olleista taksataulukoista (Tavoiteansioon... 1980) ja ne edustavat näin ollen hakkuun todellisia kustannuksia kuvatuissa olosuhteissa. Koska kokorunkojen puristuspankkojuonnolle ei ole olemassa yksikkökustannuksia, ne laskettiin käyttäen hyväksi seuraavaa kaavaa (McMoreland 1977)

Yksikkötunnukset/käyttötunti =

$$\left[\frac{I-R}{L} \left(1 + \frac{i(N+1)}{2} \right) + \frac{iRN}{L} + M+W \right] \frac{100}{U} + F \quad (8)$$

jossa I = hankintahinta, 850 000 mk
 R = jäännösarvo, 170 000 mk
 L = Koneen kokonaiskäyttöaika, 11 200 h
 i = korko- ja vakuutustekijä = .1282 (korko 11,25 %)
 N = Pitoaika, 5 v
 M = huoltokustannukset, 29,00 mk/v, öäikatunti
 W = Kuljettajan palkkakustannukset, 37,38 mk/h
 U = koneen toiminnallinen käyttöaste, 63 %
 F = poltto- ja voiteluainekustannukset, 24,00 mk/käyttötunti

Kaavan avulla lasketut koneen käyttötuntikustannukset ovat 278 mk. Puristuspankkojuonnin tuotoksiksi eri puunkokuoluokissa oletettiin vastaavasti 15,0, 17,4 ja 23,9 kiinto-kuutiometriä/käyttötunti. Täten puristuspankkojuonnin yksikkökustannukset olivat 18,50, 15,97 ja 11,62 mk/m³ rungon koon ollessa 0,225, 0,325 ja 0,550 m³.

Etelä-Suomen olosuhteisiin ei ole olemassa kokorunkojen autokuljetusta koskevia tuotos-

lukuja. Nämä luvut laskettiin käyttäen lähinnä vastaavaa kaavaa, jonka on julkaissut Granquist (1977).

$$\text{Keikka-aika} = \left[\frac{2d_i}{v_i} + \frac{VL_k}{60} + T \right] \frac{1}{U} \quad (9)$$

jossa d_i = kuljetusmatka yhteen suuntaan, kun
 v_i = keskinopeus, km/h
 V = kuljetuskapasiteetti, 50 m³
 L_k = kuorma-aika, min/m³
 U = kuorma-auton käyttöaste, 0,95
 T = purkamisaika terminaalilla

Käytetyt kuormaajat rungon koon mukaan olivat 1,63 min/m³, 1,63 min/m³ ja 1,53 min/m³. Ajonopeudet olivat aiemman esitetyn mukaiset. Laskelmien tuloksena saatiin taulukossa 4 esitetyt ajanmenekit ja ne perustuvat 50 m³:n kuormakokoon.

Runkojen kaukokuljetuskustannukset oletettiin pylväiden kaukokuljetuskustannusten mukaisiksi. Ne saatiin pylväiden kuljetusmaksutaulukosta.

Taulukko 4. Laskelmien perustana olevat kuormanhakuajat ja tuotos kokorunkojen autokuljetuksessa.

Etäisyys, km	Puun koko, m ³					
	0,225 tuntia	0,325 m ³ /h	0,325 tuntia	0,325 m ³ /h	0,550 tuntia	0,550 m ³ /h
20	2,87	17,4	2,87	17,4	2,78	18,0
50	3,77	13,3	3,77	13,3	3,68	13,6
90	4,73	10,6	4,73	10,6	4,64	10,8

4.4.4 Pääomapanos

Hakkuun metsäkuljetuksen ja kaukokuljetuksen kaikki kustannukset sisältyvät impliisiittisesti asianomaisiin taksataulukoihin niissä työvaiheissa, joille taksat ovat olemassa. Jotta saataisiin erilleen vaadittava pääomapanos, on laskelmia suoritettava erillisenä. Jos koronkorkotekijä jätetään tarkastelun ulkopuolelle, laskelmat ovat yksinkertaiset. Seuraavasta kaavasta voidaan laskea suoraan pääomapanos kuutiometriä kohti.

$$\text{Poistokustannukset/m}^3 = \frac{I - R}{P_L} \quad (10)$$

I = koneen hankintahinta

R = jäännösarvo

P_L = oletettu eliniän tuotos, m^3

Kaikkien menetelmien pääomapanokset laskettiin esitetyn kaavan avulla.

4.4.5 Rajahtovektorit

Rajahtovektorit, lukuun ottamatta kuutiomäärärajoituksia, muotoiltiin yhtäsuuruusmuotoon. Tämä tehtiin siten, että asianomaiseen rajoitusyhtälöön lisättiin apumuuttuja, jolle annettiin rajahtoa koskeva sopiva nimi. Simplex-algoritmi toimi ikään kuin "sisäisenä laskurina" siinä tapauksessa, että mitään suoraa rajoitusarvoa asianomaiselle yhtälölle ei ollut annettu. Näitä apumuuttujia yhdistelemällä oli helppo muotoilla tarvittavat lisärajoitukset asianomaisen vaihtoehdon eri kustannustarkastelujen suorittamiseksi.

5 MALLIN ANTAMAT TULOKSET

5.1 Nollavaihtoehdon optimaaliset korjuumenetelmät

Taulukon 5 kuvaamien olosuhteiden tyhjäksi jääneistä kohteista ei nollavaihtoehdon mukaan olisi edullista toimittaa puuta pienelle sahalaitykselle, ellei se muista, esimerkiksi kauppapoliittisista syistä olisi tarpeellista.

Työllistämispakotteiden johdosta mukaan tulevat pienten sahapuiden suhteellisesti edullisimmat korjuumenetelmät ovat tavara-lajimenetelmiä.

Runkomenetelmät ovat suhteellisesti edullisimmillaan keskikokoisten ja suurien puiden korjuussa lyhyiltä kuljetusmatkoilta.

Tarkasteltaessa erikseen täysin rajoittamatonta tapausta kaikkein edullisimmaksi korjuumenetelmäksi osoittautui Pika 75 -harvesteriin perustuva menetelmä lyhyillä kuljetusmatkoilla ja suurilla puilla. Kun puumäärien saatavuutta eri kuljetusmatkoilta rajoitettiin, Pika 75 -menetelmät pysyivät edelleen taloudellisimpina, mutta nyt kaikilla kuljetusmatkoilla. Tälle ratkaisulle löytyi vaihtoehtoinen optimaalinen ratkaisu. Ihmistyövaltaisen tavaralajimenetelmän käyttö olisi ollut yhtä edullista.

Taulukko 5. Nollavaihtoehdossa eri olosuhteissa käytöön tulevat korjuumenetelmät ja niillä korjattavat puumäärät vuosisatasella toimittaessa puu pienelle sahalaitykselle.

Kuljetusetäisyys	Rungon koko, m^3		
	0,225	0,325	0,550
20 km	–	Runkoharvesteri 30 000 m^3	–
50 km	Proessori 5 700 m^3	Runkoharvesteri 20 000 m^3	Runkoharvesteri 14 300 m^3
90 km	Ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä, 17 900 m^3 Proessori 6 400 m^3	–	Pika 75 5 700 m^3

Varjohintatarkastelut osoittivat, että seuraavaksi edullisimmat menetelmät olisivat olleet runkoharvesterin käyttö suurilla puilla ja lyhyillä kuljetusmatkoilla ja ihmistyövaltaisen runkomenetelmä keskisuurilla puilla ja keskipitkillä kuljetusmatkoilla ja edelleen Pika 75 suurilla puilla ja keskipitkillä matkoilla. Näiden kaikkien menetelmien lisäkustannukset olisivat olleet vähemmän kuin 0,15 mk/ m^3 .

5.2 Tavoitefunktion kertoimien muutoksen vaikutukset

Taulukossa 6 on esitetty optimaalisen ratkaisun muuttuminen silloin, kun runkomenetelmien kustannuskertoimet tavoitefunktiossa muuttuvat.

Kun runkoharvesterilla korjattavan puuraaka-aineen arvo alennetaan, optimaalisen ratkaisun runkomenetelmät korvautuvat Pika 75 -harvesteriin perustuvilla menetelmillä. Raja-arvo sille, että kaikki runkomenetelmät poistuvat kantaratkaisusta, on $-14,85$ mk/ m^3 . Tämä merkitsee sitä, että jos runkomenetelmillä korjatun raaka-aineen arvo alenee $14,85$ mk/ m^3 tai enemmän nollavaihtoehtoon (menetelmästä riippumaton raaka-aineen arvo) verrattuna, korjuun runkomenetelmät eivät missään olosuhteissa olisi taloudellisesti perusteltavissa.

Vastaavalla tavalla runkomenetelmillä korjattavan raaka-aineen arvoa kasvattamalla (parametri θ kasvaa) optimaalinen ratkaisu muuttuu siten, että runkoharvesteriin perustuvien menetelmien osuus kasvaa. Raja-arvo, jonka jälkeen kantaratkaisu ei enää muutu, on välillä $5-10$ mk/ m^3 , vaikka parametri θ kasvaisi kohti ääretöntä.

Syynä sille, että tavaralajimenetelmät eivät kokonaan poistu kantaratkaisusta, on työllistämispakotteet sekä hakkuun että kuorma-traktoreilla tehtävän metsäkuljetuksen osalta.

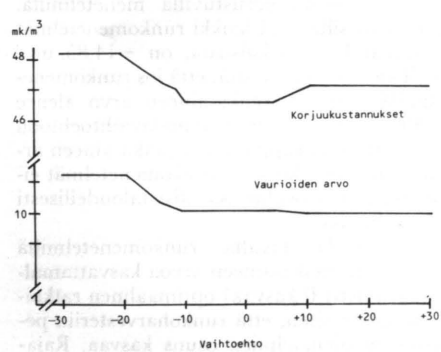
Kuvista 2 ja 3 sekä taulukosta 7 nähdään optimaalisen ratkaisun käyttäytyminen.

Kun runkomenetelmien osuus lisääntyy,

Taulukko 6. Optimaalisen ratkaisun muutos parametrisessä tarkastelussa vaihtoehdon mukaan.

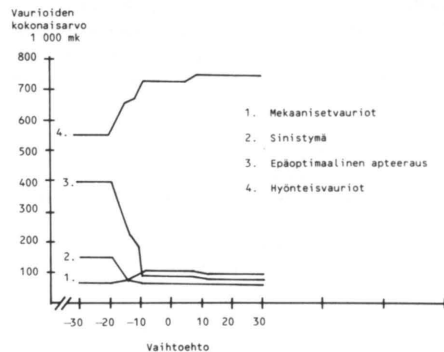
Arvon muutostaso	Kuljetusetäisyys											
	20 km			50 km			90 km					
	0,225 m ³ Men. %	0,325 m ³ Men. %	0,550 m ³ Men. %	0,225 m ³ Men. %	0,325 m ³ Men. %	0,550 m ³ Men. %	0,225 m ³ Men. %	0,325 m ³ Men. %	0,550 m ³ Men. %			
-30,00	-	-	x ₃ 30,0	-	-	x ₁ 17,9 x ₂ 12,1	x ₃ 10,0	-	-	-	x ₃ 10,0	x ₃ 20,0
-20,00	-	-	x ₃ 30,0	-	-	x ₁ 17,9 x ₂ 12,1	x ₃ 10,0	-	-	-	x ₃ 10,0	x ₃ 20,0
-14,85	-	-	y ₂ 30,0	-	-	x ₁ 17,9 x ₂ 12,1	y ₂ 10,0	-	-	-	x ₃ 10,0	x ₃ 20,0
-12,00	-	-	y ₂ 30,0	-	-	x ₁ 17,9 x ₂ 12,1	y ₂ 20,0	-	-	x ₁ 10,0	-	x ₃ 20,0
-10,00	-	-	y ₂ 30,0	-	-	x ₂ 5,7	y ₂ 20,0	y ₂ 14,3	x ₁ 17,9 x ₂ 6,4	-	-	x ₃ 5,7
- 5,00	-	-	y ₂ 30,0	-	-	x ₂ 5,7	y ₂ 20,0	y ₂ 14,3	x ₁ 17,9 x ₂ 6,4	-	-	x ₃ 5,7
± 0,00	-	-	y ₂ 30,0	-	-	x ₂ 5,7	y ₂ 20,0	y ₂ 14,3	x ₁ 17,9 x ₂ 6,4	-	-	x ₃ 5,7
+ 5,00	-	-	y ₂ 30,0	-	-	x ₂ 5,7	y ₂ 20,0	y ₂ 14,3	x ₁ 17,9 x ₂ 6,4	-	-	x ₃ 5,7
+10,00	-	-	y ₂ 30,0	-	-	x ₁ 4,2	y ₂ 20,0	y ₂ 15,8	x ₁ 25,8	-	-	x ₃ 4,2
+30,00	-	-	y ₂ 30,0	-	-	x ₁ 4,2	y ₂ 20,0	y ₂ 15,8	x ₁ 25,8	-	-	x ₃ 4,2

Korjuumenetelmät: x₁ = Ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä; x₂ = Proessori; x₃ = Pika 75
y₁ = Ihmistyövaltainen runkomenetelmä; y₂ = Runkoharvesteri



Kuva 2. Keskimääräiset korjuukustannukset ja puutavaran vaurioiden arvo vaihtoehdon mukaan.

keskimääräiset korjuukustannukset alenevat. Samoin laskee eri vaurioiden yhteenlaskettu keskimääräinen arvo. Tämä johtuu epäoptimaalisesta apteerauksesta aiheutuvien tappioiden tuntuvasta vähenemisestä runkomenetelmien osuuden kasvaessa. Puutavaran me-



Kuva 3. Puutavaran eri vauriokomponenttien kokonaisarvo vaihtoehdon mukaan.

kaanisista vaurioista ja sinistymästä aiheutuvat kokonaistappiot pysyvät lähes muuttumattomina. Runkomenetelmien käytön lisääminen kasvattaisi hyönteisten aiheuttamien vahinkojen määrää ja arvoa.

Muiden vaikutusten, lähinnä investointira-

Taulukko 7. Eri parametrien arvojen muuttuminen tarkastellun vaihtoehdon mukaan.

Tunnusluku	Vaihtoehto, mk/m ³ -muutos							
	-20,00	-14,85	-12,00	-10,00	±0,00	+5,00	+10,00	+30,00
Tukkiosuus, %	70,0	72,4	73,0	73,6	73,6	73,6	73,6	73,6
Keskimääräinen runkokoko, m ³	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340	0,340
Keskimääräinen kuljetusetäisyys, km	53	53	53	53	53	53	53	53
Keskimääräiset								
- korjuukustannukset, mk/m ³	48,61	47,34	47,14	46,78	46,78	46,78	47,11	47,11
- vaurioiden arvot, mk/m ³	11,36	10,68	10,51	10,24	10,24	10,24	10,12	10,12
Korjuumenetelmäjakauma, %								
- ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	17,9	30,0	30,0
- koneellinen tavaralajimenetelmä	82,1	42,1	32,1	17,8	17,8	17,8	4,2	4,2
- runkoharvesteri	-	40,0	50,0	64,3	64,3	64,3	65,8	65,8

Taulukko 8. Työllistämiselvoitteen ja investointivarojen rajoittamisen vaikutus optimaaliseen korjuumenetelmävalintaan.

Ratkaisu- vaihtoehto	Kuljetus- etäisyys, km	Rungon koko, m ³		
		0,225	0,325	0,550
Optimaalinen ratkaisu, ei rajoituksia b-vektorissa	20	-	Runkoharvesteri	-
	50	Proessori	Runkoharvesteri	Runkoharvesteri
	90	Proessori ja ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	-	Pika 75 -harvesteri
Lisätyöllistämiselvoite	20	-	Runkoharvesteri	-
	50	Ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	Runkoharvesteri ja ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	Runkoharvesteri
	90	Ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	Ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	-
Investointirajoitus (8,50 mk/m ³)	20	-	Runkoharvesteri	Runkoharvesteri
	50	-	Ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	-
	90	Ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	-	-

joitusten ja työllistämiselvoitteiden, tutkimiseksi suoritettiin lisäanalyysjä. Näiden tulokset on esitetty taulukoissa 8 ja 9. Molempien rajoitusten kiristäminen vähentäisi ensimmäiseksi prosessoreiden ja Pika 75 -harvesterin käyttöä. Aluksi investointirajoitus asetettiin niin alhaiseksi, että se rajoitti kor-

jattavaksi tulevaa kokonaispuumäärää. Tavoiteohjelmointiin perustuvalla lähestymistavalla ratkaistiin korjattavaa kuutiometriä kohti tarpeellinen pienin investointipanos, joka vielä mahdollisti käyvän kantaratkaisun löytymisen. Tämä investointipanos oli korjattavalle puumäärälle 9,60 mk/m³.

Taulukko 9. Taulukossa 8 esitettyjen vaihtoehtojen tunnuslukuja.

Tunnusluku	Rajoittamaton	Vaihtoehto	
		Työllistämispakote	Investointirajoitus
Tukkiosuus, %	73,6	73,6	74,2
Keskimääräinen runkokoko, m ³	0,340	0,340	0,357
Keskimääräinen kuljetusetäisyys, km	53	53	48
Keskimääräiset korjuukustannukset, mk/m ³	46,78	48,53	41,14
Keskimääräinen vaurioiden arvo, mk/m ³	10,24	10,69	10,96
Korjuumenetelmäjakauma		%	
– ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä	17,9	33,6	65,6
– ihmistyövaltainen runkomenetelmä	–	11,5	–
– koneelliset tavaralajimenetelmät	17,8	–	–
– runkoharvesteri	64,3	54,9	34,4

Taulukko 10. Optimaaliset korjuumenetelmävaihtoehdot toimittaessa puu isolle sahalaitekselle vaihtoehdon mukaan.

Vaihtoehto, mk	Kuljetusetäisyys, km	Rungon koko 0,225 m ³		Rungon koko 0,325 m ³		Rungon koko 0,550 m ³	
		Menetelmä	%	Menetelmä	%	Menetelmä	%
–20*	20	Tavaralaji	2,0	Proessori	15,0	Pika 75	3,0
	50	Tavaralaji	4,0	Proessori	30,0	Pika 75	6,0
	90	Tavaralaji	4,0	Tavaralaji ja prosessori	13,6 1,4	Pika 75	21,0
–15*	20	Tavaralaji	2,0	Runkoharvesteri	15,0	Pika 75	3,0
	50	Tavaralaji	4,0	Tavaralaji ja prosessori	3,0 27,0	Pika 75	6,0
	90	Tavaralaji	4,0	Tavaralaji	15,0	Pika 75	21,0
±0*	20	Tavaralaji	2,0	Runkoharvesteri	15,0	Runkoharvesteri	3,0
	50	Tavaralaji	4,0	Tavaralaji ja runkoharvesteri	2,0 13,0	Runkoharvesteri	21,0
	90	Tavaralaji	4,0	Tavaralaji ja runkoharvesteri	22,3 7,7	Runkoharvesteri	6,0
+10*	20	Tavaralaji	2,0	Tavaralaji ja runkoharvesteri	2,0 13,0	Runkoharvesteri	3,0
	50	Tavaralaji	4,0	Runkoharvesteri	22,7	Runkoharvesteri	13,3
	90	Tavaralaji	4,0	Tavaralaji	22,3	Runkoharvesteri	13,7

* Vaihtoehto –20 = Runkomenetelmällä korjatusta puusta saatavan puuraaka-aineen arvo on 20 mk nollavaihtoehtoa alempi

Vaihtoehto –15 = Runkomenetelmällä korjatusta puusta saatavan puuraaka-aineen arvo on 15 mk nollavaihtoehtoa alempi

Vaihtoehto ± 0 = Perusvertailun tarkastelu, jossa menetelmästä riippumatta puuraaka-aineen arvo on sama

Vaihtoehto +10 = Runkomenetelmällä korjatun puuraaka-aineen arvo oletetaan 10 mk/m³ suuremmaksi kuin nollavaihtoehdossa

Mallilla tutkittiin myös prosessoreiden käytön tukeille aiheuttamien mekaanisten vaurioiden merkitystä. Alkuelämä oli, että prosessorit oli varustettu piikkisyöttörullilla, jotka aiheuttavat vaurioita tukkien pintaan. Koska oli ilmeistä, että tämäntyyppiset puunsyöttöelimet poistuvat käytöstä lähitule-

vaisuudessa, prosessoreiden tukeille aiheuttamien mekaanisten vaurioiden arvo alennettiin puoleen alkuperäisestä. Tällä toimenpiteellä ei ollut vaikutusta optimaaliseen kantaratkaisuun, toisin sanoen piikkirullien käyttö prosessoreissa ei ollut niiden käyttöä taloudellisesti rajoittava tekijä.

Taulukko 11. Mallilla laskettuja keskimääräisiä muuttujien arvoja vaihtoehdottain ison sahalaiteksen tapauksessa.

Kohde	–20	–15	Vaihtoehto, mk	
			±0	+10
Arvo, mk/m ³				
Vaurioiden arvo, josta	14,03	13,06	11,10	11,10
– mekaanisia	1,64	1,49	1,18	1,18
– sinistymää	1,61	1,29	0,95	0,95
– hyönteisten aiheuttamaa	7,06	7,21	8,13	8,13
– ei optimaalinen katkenta	3,72	3,07	0,84	0,84
Keskimääräiset korjuukustannukset, joista	47,12	47,40	47,65	47,65
– ihmistyövaltainen hakkuu	19,49	21,51	21,01	21,01
– koneellinen hakkuu	12,74	11,72	8,08	8,08
Metsäkuljetus				
– kuormajuonto	10,75	10,75	10,48	10,48
– laahusuonto	–	12,18	11,05	11,05
Kaukokuljetus				
– tukit	18,30	20,64	21,75	21,75
– kuitupuu	18,91	16,14	21,72	21,72
– rungot	–	14,20	20,31	20,31
– hake	–	8,00	9,36	9,36
Varastointikustannukset*	2,00	2,09	2,47	2,47
Työpanos, miestyöpäivää	28 367	29 526	29 293	29 296
– tavaralajihakkuu	15 400	15 400	15 400	15 400
– koneellinen hakkuu	4 241	3 564	1 620	1 620
– metsäkuljetus	5 246	6 631	4 805	4 805
– kaukokuljetus	3 480	3 931	6 483	6 483
Konetuntipanos/vuosi				
– kuormatraktorit	40 283	34 504	14 400	14 400
– laahustraktorit	–	3 285	13 045	13 045
– prosessorit	12 589	7 336	–	–
– Pika 75 -harvesteri	7 395	7 395	–	–
– runkoharvesteri	–	2 048	7 584	7 584
Autokuljetuksen työtuntitarve	24 256	26 626	37 200	37 200
Investointitarve vuodessa, mk/m ³	11,23	9,21	10,70	10,70

* Alkuelämänsä mukaan jokainen varastoitu kuutiometri puuta aiheuttaa 2 m³n varastokustannukset neliöltä. Eri menetelmillä on erilainen varastotarve, josta johtuvat erilaiset varastojen ylläpitokustannukset.

5.3 Rajaehtovektorin muutosten vaikutukset

Kuten aiemmin on mainittu, yksi tämän tutkimuksen päämäärästä oli tarkastella myös korjuu- ja kuljetusmenetelmiä, jotka tulisivat käyttöön korjattaessa puuta suurelle sahalaitekselle. Sen osalta rajaehtovektori oli esitetty aikaisemmin sivulla 77.

Suuren sahalaiteksen osalta tarkasteltiin eri korjuumenetelmiä neljän eri kustannus-

vaihtoehdon tasolla. Päätulokset on esitetty taulukoissa 10 ja 11. Taulukosta 10 havaitaan, että suurelle sahalaitekselle puuta korjattaessa käyttöön tuleva korjuuketujakauma on lähes samanlainen, kuin mitä se on pienen sahalaiteksen osalta.

Niin kutsutussa nollavaihtoehdossa pienet puut korjataan ihmistyövaltaisilla tavaralajimenetelmillä, keskikokoiset ja suuret puut runkomenetelmillä. Erityispiirre tässä tapauksessa on, että myös ihmistyövaltainen

runkomenetelmä tulee käyttöön keskipitkillä kuljetusetaisyyksillä. Pika 75 -harvesteriin perustuva menetelmä korvaa myös tässä tapauksessa runkoharvesteriin perustuvan menetelmän, kun runkomenetelmällä korjattavan raaka-aineen arvoa alennetaan. Tämä tapahtuu ensimmäiseksi keskiuurten puiden kokoluokassa. Runkomenetelmällä saatavan raaka-aineen arvon kasvattaminen ei tässä tapauksessa muuta optimaalista korjuuketjujakaumaa. Taulukosta ilmenee näin ollen optimaalinen korjuumenetelmäjakauma kaikissa tutkituissa olosuhteissa.

Taulukon 11 kustannusluvut ilmoittavat todelliset kuutiometrikustannukset tiettyä menetelmää käyttäen. Niitä ei näin ollen voida laskea yhteen keskimääräisten kokonaiskustannusten laskemiseksi. Keskimääräiset kokonaiskustannukset kuutiometriä kohti saadaan kertomalla kyseessä olevat kustannukset asianomaisen menetelmän osuudella ja laskemalla ne sitten yhteen.

5.4 Laskennallisia kokemuksia

Malli tässä muodossaan käsitti 126 muuttujaa ja 88 rajoitusyhtälöä. Mallin tiheys oli 11,5 % ja mallin tuotoilusta johtuen apumuuttujien lukumäärä oli varsin suuri. Ongelman kantaratkaisu löytyi 167 iteraation ja 16.23 sekunnin keskusyksikköajan jälkeen, käytettäessä CDC:n Cyber 7000 -tietokonetta ja Northwest Universityn MPOS -lineaarisen ohjelmoinnin pakettia (Cohen ja Stein 1976). Duaalinen simplex-algoritmi toimi huomattavasti hitaammin tässä tapauksessa; se vaati 503 iteraatiota ja 38,9 sekuntia keskusyksikköaikaa. Ilmeisestikin tavallinen simplex-algoritmi on tämän tyyppisen ongelman ratkaisussa huomattavasti tehokkaampi.

6 OPTIMAALISEN KORJUUMENETELMÄN VALINTA

6.1 Parametrisen lähestymistavan vaikutukset

Parametrisen ohjelmoinnin yksi tärkeä ja käyttökelpoinen ominaisuus on se, että voidaan laskea useita peräkkäisiä optimaalisia ratkaisuja. Tämä on erityisen käyttökelpoista silloin, kun ratkaisuun ja parametrien arvoihin liittyy tietty epävarmuus. Tarkastelemalla peräkkäisiä ratkaisuja päätöksentekijä tietää, mihin suuntaan toimintaa on ohjattava, vaikka alkuperäiset arvot eivät olisikaan aivan oikeat tai parametrien arvossa on tapahtunut äkillinen muutos.

Tässä tapauksessa parametrinen lähestymistapa, vaikkakin karkealla tasolla toimiva, antaa korjuumenetelmien optimaalisen jakauman eri vaihtoehtojen tasolla sekä niihin liittyvät kustannukset ja muut panostekijät. Vaihtoehtoja tarkastellaan kustannuksellisesti tasolla ja näin päätöksentekijä voi tehdä

ratkaisunsa parhaan mahdollisen tietämyksensä mukaan siitä, onko järkevää ryhtyä käyttämään runkomenetelmiä vai ei.

6.2 Ratkaisun herkkyyden tarkastelu

Koska parametrinen ohjelmointi on tavallaan herkkyyksanalyysin jatke, myös optimaalisen ratkaisun raja-arvot voidaan laskea peräkkäisille ratkaisuille parametrin lähestymistapaa käytettäessä. Herkkyyksanalyysit osoittivat, että optimaaliset ratkaisut eivät olleet kovinkaan herkkiä kustannuskertoimien muutoksille. Tämä merkitsee, että optimaaliset ratkaisut ovat varsin stabiileja usean markan vaihteluvälillä kussakin kantaratkaisussa. Toisaalta tämä merkitsee, että käytetyn tyyppistä karkeahkoa lähestymistapaa voidaan käyttää optimaalisten korjuumenetelmien määrittämiseen eri olosuhteisiin.

7 PÄÄTELMÄT

7.1 Tutkimuksen suuntaaminen tulevaisuudessa

Tämän tutkimuksen aikana kävi ilmi, että on selvästikin olemassa tarve sellaisten tietokoneohjelmistojen aikaansaamiseksi, joilla usean muuttujan parametrinen tarkastelu samanaikaisesti on mahdollista. Onneksi kehittyneimmät kaupalliset lineaarisen ohjelmoinnin tietokonesovellutukset tämän jo sisältävätkin. Tutkimusongelman mallittamisen osalta on todettava, että mallirakennelmia on kehitettävä siihen suuntaan, että suurempi määrä erilaisia olosuhteita voidaan tarkastella ottaa huomioon. Näin malli ei rajoittaisi todellisen elämän ongelmien kuvaamista, mitkä sinänsä voivat olla varsin monimuotoisia ja monimutkaisia.

Kolmanneksi tulevaisuudessa tulisi tutki-
musta suunnata siten, että operaatiotutkimuksen ja matemaattisen ohjelmoinnin mal-

leja voitaisiin käyttää jokapäiväisenä apuvälineenä puunkorjuu- ja kuljetustoiminnan ohjaamisessa.

7.2 Tulosten hyödyntäminen

Tätä mallia voidaan suoraan käyttää hyväksi sahalaitoksilla investointien suunnittelun apuvälineenä laskettaessa eri vaihtoehtojen kustannuksia. Sitä voidaan myös käyttää sahapuun korjuumenetelmävalinnan apuvälineenä sekä siihen liittyvien teknisten seikkojen tarkasteluun. Kolmanneksi nyt tehty tutkimus osoittaa, että operaatiotutkimuksen ja matemaattisen ohjelmoinnin mallit ovat käyttökelpoisia tämäntyyppisten ongelmien ratkaisuisissa. Muut tutkijat voivat toivottavasti tältä pohjalta lähteä kehittämään yhä laajempia mallisovellutuksia puunkorjuun alalla.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- COHEN, C. & STEIN, J. 1976. Multipurpose Optimization System. Version 4. Northwestern University. Evanston, Illinois.
- ESKELINEN, A. & PELTONEN, J. 1977. Puunhankinnan suunnittelumalleilla suoritettava raakapuutarastojen koon optimointi. Metsätehon tiedotus 343. Helsinki.
- & PENNANEN, O. 1979. Havupuiden apteeraus ja puutavaralajijakauma eri hakkuumenetelmissä. Metsätehon tiedotus 358. Helsinki.
- GRANQUIST, Å. 1977. Tree-length Logging and Central Processing at Sawmills. Royal College of Forestry. Department of Operational Efficiency. Research Notes 79. Garpenberg.
- KAHALA, M. 1969. Tutkimus puutavaran valmistukseen vaikuttavista tekijöistä. Metsätehon julkaisu 44. Helsinki.
- 1979. Puutavaran kuormatruktorikuljetus ja siihen vaikuttavat tekijät. Metsätehon tiedotus 355. Helsinki.
- LARSSON, M. & NILSSON, G. 1977. Drivning, transport och terminalhantering av stammar i Sverige. Skogsarbeten. Redogörelse 9/1977. Stockholm.
- McMORELAND, B. 1977. Evaluation of Volvo BM 971 Clam Bunk Skidder. FERIC. Technical Report No. TR -16. Quebec.
- Metsä- ja uuttoalan työehtosopimus ja sen mukaiset m³-perustaiset metsätyöpalkkojen taulukot. Palkkausalue 4. 1979. Kar-Print. Helsinki.
- Metsätalastollinen vuosikirja 1977-1978. 1979. Folia For. 375. Helsinki.
- MIKKONEN, E. 1977. Puutavaran lajittelu monitoimikoneilla. Metsätehon tiedotus 344. Helsinki.
- , PELTONEN, J. & SILVENNOINEN, U. 1979. Lokomo 961 T -harvesteri. Metsätehon katsaus 1/1979. Helsinki.
- MYLLYNIEMI, A. 1977. Työvaikeustekijöiden vaikutus palstalla toimivien monitoimikoneiden tuotokseen. Metsätehon tiedotus 345. Helsinki.
- 1980. Silmävaraisesti katkotun pitkän kuitupuun autoonkuormaus. Metsätehon katsaus 3/1980. Helsinki.
- MÄKELÄ, M. 1979. Työvaikeustekijöiden vaikutus Pika 75 -harvesterin tuotokseen. Metsätehon tiedotus 354. Helsinki.
- & PENNANEN, O. 1980. Sahatukien valmistus- ja varastointivaurioiden merkitys eri karsintamenetelmissä. Metsätehon tiedotus 361. Helsinki.
- SALMINEN, J. 1979. Sahapuiden runkoinahankinta. Metsätehon katsaus 15/1979. Helsinki.
- SIMMONS, D. 1972. Linear Programming for Operations Research. Holden-Day, Inc. San Francisco.
- SIMPSON, M. L. Jr. 1970. A Computer Simulation Model for Use in Considering Alternative Wood Procurement Policies. Master of Forestry Paper. Virginia Polytechnic Institute. Virginia.
- TAHA, H. 1972. Operations Research. McMillan. New York.
- Tavoiteansioon perustuvat puutavaran metsätraktori-kuljetusmaksut Etelä-Suomessa. 1980. Metsäalan Kuljetuksenantajat. Helsinki.
- THESSLUND, O. 1979. Kokorunkoharvesterilla valmistettujen runkojen laahusuonto puristuspankkokoneella. Metsähallituksen kehittämisjaosto. Koelostus 130. Hirvas.
- TILGHMAN, W. G. 1967. Linear Programming Approach to Minimize Wood Procurement Cost for Integrated Forest Products Firm. Master of Forestry Paper. Virginia Polytechnic Institute. Virginia.
- ZIONTS, S. 1974. Linear and Integer Programming. Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.

LIITE

TITLE
 TREE-LENGTH LOGGING STUDY
 REGULAR
 MAXIMIZE

174X111+174X112+174X113+217X121+217X122+217X123+228X131+228X132+228X133
 +174X211+174X212+174X213+217X221+217X222+217X223+228X231+228X232+228X233
 +174X311+174X312+174X313+217X321+217X322+217X323+228X331+228X332+228X333
 +183Y111+183Y112+183Y113+228Y121+228Y122+228Y123+235Y131+235Y132+235Y133
 +183Y211+183Y212+183Y213+228Y221+228Y222+228Y223+235Y231+235Y232+235Y233
 -MECHDAM-BLSTAIN-INSECTS-HOPTCUT-HANCCOST-NECCOST-FULCOST-FWPCOST
 -SKDCOST-LLDCOST-PLDCOST-TRTCOST-CHPCOST-2STOCOST
 CONSTRAINTS

1. X111+X112+X113+X121+X122+X123+X131+X132+X133
 +X211+X212+X213+X221+X222+X223+X231+X232+X233
 +X311+X312+X313+X321+X322+X323+X331+X332+X333
 +Y111+Y112+Y113+Y121+Y122+Y123+Y131+Y132+Y133
 +Y211+Y212+Y213+Y221+Y222+Y223+Y231+Y232+Y233 .LE. 100000

2. .52X111+.52X112+.52X113+.76X121+.76X122+.76X123+.82X131+.82X132+.82X133
 +.52X211+.52X212+.52X213+.76X221+.76X222+.76X223+.82X231+.82X232+.82X233
 +.52X311+.52X312+.52X313+.76X321+.76X322+.76X323+.82X331+.82X332+.82X333
 +.57Y111+.57Y112+.57Y113+.82Y121+.82Y122+.82Y123+.86Y131+.86Y132+.86Y133
 +.57Y211+.57Y212+.57Y213+.82Y221+.82Y222+.82Y223+.86Y231+.86Y232+.86Y233
 -LOGCOST .EQ. 0

3. X131+X132+X133+X231+X232+X233+X331+X332+X333
 +Y131+Y132+Y133+Y231+Y232+Y233 .LE. 20000

4. X121+X122+X123+X221+X222+X223+X321+X322+X323
 +Y121+Y122+Y123+Y221+Y222+Y223 .LE. 50000

5. X111+X121+X131
 +X211+X221+X231
 +X311+X321+X331
 +Y111+Y121+Y131
 +Y211+Y221+Y231 .LE. 30000

6. X111+X121+X131
 +X211+X221+X231
 +X311+X321+X331
 +Y111+Y121+Y131
 +Y211+Y221+Y231
 +X112+X122+X132
 +X212+X222+X232
 +X312+X322+X332
 +Y112+Y122+Y132
 +Y212+Y222+Y232 .LE. 70000

7. X111+X112+X113+X121+X122+X123+X131+X132+X133
 +X211+X212+X213+X221+X222+X223+X231+X232+X233
 +X311+X312+X313+X321+X322+X323+X331+X332+X333
 +1.3Y111+1.3Y112+1.3Y113+1.3Y121+1.3Y122+1.3Y123+1.4Y131+1.4Y132+1.4Y133
 +1.3Y211+1.3Y212+1.3Y213+1.3Y221+1.3Y222+1.3Y223+1.4Y231+1.4Y232+1.4Y233
 -STOCOST .EQ. 0

8. 0.41X111+0.41X112+0.41X113+0.59X121+0.59X122+0.59X123+0.64X131+0.64X132+0.64X133
 +2.16X211+2.16X212+2.16X213+3.16X221+3.16X222+3.16X223+4.2X231+4.2X232+4.2X233
 +0.14X311+0.14X312+0.14X313+0.20X321+0.20X322+0.20X323+0.2X331+0.2X332+0.2X333
 +0.15Y111+0.15Y112+0.15Y113+0.21Y121+0.21Y122+0.21Y123+0.22Y131+0.22Y132+0.22Y133
 +1.04Y211+1.04Y212+1.04Y213+1.5Y221+1.5Y222+1.5Y223+1.57Y231+1.57Y232+1.57Y233
 -MECHDAM .EQ. 0

9. 1.76X111+1.76X112+1.76X113+2.57X121+2.57X122+2.57X123+2.77X131+2.77X132+2.77X133
 +.95X211+.95X212+.95X213+1.38X221+1.38X222+1.38X223+1.49X231+1.49X232+1.49X233
 +.95X311+.95X312+.95X313+1.38X321+1.38X322+1.38X323+1.49X331+1.49X332+1.49X333
 +1.96Y111+1.96Y112+1.96Y113+2.77Y121+2.77Y122+2.77Y123+2.9Y131+2.9Y132+2.9Y133
 +.15Y211+.15Y212+.15Y213+.21Y221+.21Y222+.21Y223+.22Y231+.22Y232+.22Y233
 -BLSTAIN .EQ. 0

10. 6.49X111+6.49X112+6.49X113+9.5X121+9.5X122+9.5X123+10.2X131+10.2X132+10.2X133
 +5.0X211+5.0X212+5.0X213+7.31X221+7.31X222+7.31X223+7.89X231+7.89X232+7.89X233
 +3.65X311+3.65X312+3.65X313+5.3X321+5.3X322+5.3X323+5.76X331+5.76X332+5.76X333
 +7.1Y111+7.1Y112+7.1Y113+10.2Y121+10.2Y122+10.2Y123+10.7Y131+10.7Y132+10.7Y133
 +5.34Y211+5.34Y212+5.34Y213+7.68Y221+7.68Y222+7.68Y223+8.05Y231+8.05Y232
 +8.05Y233 -INSECTS .EQ. 0

11. 2.61X111+2.61X112+2.61X113+2.61X121+2.61X122+2.61X123+2.61X131+2.61X132+2.61X133
 +3.96X211+3.96X212+3.96X213+3.96X221+3.96X222+3.96X223+3.96X231+3.96X232
 +3.96X233
 +4.22X311+4.22X312+4.22X313+4.22X321+4.22X322+4.22X323+4.22X331+4.22X332
 +4.22X333 -HOPTCUT .EQ. 0

12. 22.75X111+22.75X112+22.75X113+20.53X121+20.53X122+20.53X123+17.55X131
 +17.55X132+17.55X133
 +3.69X211+3.69X212+3.69X213+3.39X221+3.39X222+3.39X223+3.18X231+3.18X232
 +3.18X233

+19.86Y111+19.86Y112+19.86Y113+17.67Y121+17.67Y122+17.67Y123+14.32Y131
 +14.32Y132+14.32Y133 -HANCCOST .EQ. 0

13. 16.00X211+16.00X212+16.00X213+11.70X221+11.70X222+11.70X223+8.50X231+8.50X232
 +8.50X233
 +26.78X311+26.78X312+26.78X313+19.27X321+19.27X322+19.27X323+12.82X331
 +12.82X332+12.82X333
 +12.91Y121+12.91Y122+12.91Y123+9.56Y221+9.56Y222+9.56Y223+6.33Y231+6.33Y232
 +6.33Y233 -NECCOST .EQ. 0

14. 5.73X111+5.73X112+5.73X113+8.28X121+8.28X122+8.28X123+8.98X131+8.98X132+8.98X133
 +5.40X211+5.40X212+5.40X213+7.81X221+7.81X222+7.81X223+8.47X231+8.47X232
 +8.47X233
 +5.11X311+5.11X312+5.11X313+7.38X321+7.38X322+7.38X323+8.01X331+8.01X332
 +8.01X333 -FWPCOST .EQ. 0

15. 5.39X111+5.39X112+5.39X113+2.86X121+2.86X122+2.86X123+2.22X131+2.22X132+2.22X133
 +5.68X211+5.68X212+5.68X213+3.01X221+3.01X222+3.01X223+2.33X231+2.33X232
 +2.33X233
 +5.68X311+5.68X312+5.68X313+3.01X321+3.01X322+3.01X323+2.33X331+2.33X332
 +2.33X333 -PLDCOST .EQ. 0

16. 18.50Y111+18.50Y112+18.50Y113+15.97Y121+15.97Y122+15.97Y123+11.62Y131+11.62Y132
 +11.62Y133
 +15.18Y211+15.18Y212+15.18Y213+12.18Y221+12.18Y222+12.18Y223+8.62Y231+8.62Y232
 +8.62Y233 -SKDCOST .EQ. 0

17. 6.11X111+8.86X112+12.01X113+8.82X121+12.81X122+17.35X123+9.58X131+13.90X132
 +18.83X133
 +6.11X211+8.86X212+12.01X213+8.82X221+12.81X222+17.35X223+9.58X231+13.90X232
 +18.83X233
 +6.11X311+8.86X312+12.01X313+8.82X321+12.81X322+17.35X323+9.58X331+13.90X332
 +18.83X333 -LLDCOST .EQ. 0

18. 5.99X111+8.41X112+11.43X113+3.03X121+4.26X122+5.79X123+2.21X131+3.11X132
 +4.22X133
 +5.99X211+8.41X212+11.43X213+3.03X221+4.26X222+5.79X223+2.21X231+3.11X232
 +4.22X233
 +5.99X311+8.41X312+11.43X313+3.03X321+4.26X322+5.79X323+2.21X331+3.11X332
 +4.22X333 -PLDCOST .EQ. 0

19. 14.20Y111+20.43Y112+28.01Y113+14.20Y121+20.43Y122+28.01Y123+14.20Y131+20.43Y132
 +28.01Y133
 +14.20Y211+20.43Y212+28.01Y213+14.20Y221+20.43Y222+28.01Y223+14.20Y231
 +20.43Y232+28.01Y233 -TRTCOST .EQ. 0

20. 3.39Y111+4.29Y112+4.29Y113+1.44Y121+1.82Y122+1.07Y131+1.36Y132+1.36Y133
 +3.39Y211+4.29Y212+4.29Y213+1.44Y221+1.82Y222+1.82Y223+1.07Y231+1.36Y232
 +1.36Y233 -CHPCOST .LE. 0

21. 9.71X111+9.71X112+9.71X113+8.77X121+8.77X122+8.77X123+7.51X131+7.51X132+7.51X133
 -MDFCUT1 .EQ. 0

22. 0.80X111+0.80X112+0.80X113+1.16X121+1.16X122+1.16X123+1.25X131+1.25X132+1.25X133
 -MDFCUT2 .EQ. 0

23. 0.76X111+0.76X112+0.76X113+0.40X121+0.40X122+0.40X123+0.31X131+0.31X132+0.31X133
 -MDFCUT3 .EQ. 0

24. 0.34X111+0.45X112+0.56X113+0.34X121+0.45X122+0.56X123+0.34X131+0.45X132+0.56X133
 -MDFCUT4 .EQ. 0

25. 0.32X111+0.21X112+0.19X113+0.32X121+0.21X122+0.19X123+0.32X131+0.21X132+0.19X133
 -MDFCUT5 .EQ. 0

26. 4.57X111+4.57X112+4.57X113+6.60X121+6.60X122+6.60X123+7.16X131+7.16X132+7.16X133
 -FRULOG1 .EQ. 0

27. 4.36X111+4.36X112+4.36X113+2.31X121+2.31X122+2.31X123+1.79X131+1.79X132+1.79X133
 -FRULOG2 .EQ. 0

28. 1.84X111+2.40X112+3.00X113+2.65X121+3.47X122+4.34X123+2.88X131+3.76X132+4.71X133
 -TRUCKL1 .EQ. 0

29. 1.75X111+2.26X112+2.71X113+0.89X121+1.14X122+1.42X123+0.65X131+0.83X132+1.03X133
 -TRUCKP1 .EQ. 0

30. 0.89X111+0.89X112+0.89X113+0.89X121+0.89X122+0.89X123+0.89X131+0.89X132+0.89X133
 -CHSAW1 .EQ. 0

31. 3.70X111+3.70X112+3.70X113+5.34X121+5.34X122+5.34X123+5.80X131+5.80X132+5.80X133
 -FRULIM .EQ. 0

32. 3.52X111+3.52X112+3.52X113+1.87X121+1.87X122+1.87X123+1.45X131+1.45X132+1.45X133
 -FRUPI .EQ. 0

33. 1.26X111+1.63X112+2.03X113+1.26X121+1.63X122+2.06X123+1.26X131+1.63X132+2.03X133
 -TRUCIM .EQ. 0

34. 2.15X111+2.15X112+2.15X113+1.97X221+1.97X222+1.97X223+1.85X231+1.85X232+1.85X233
 -MDFCUT2 .EQ. 0

35. 1.51X121+1.51X213+1.51X231+1.51X221+1.51X222+1.51X223+0.75X231+0.75X232+0.75X233
 -MDFPRC2 .EQ. 0

36. 0.69X211+0.69X212+0.69X213+1.00X221+1.00X222+1.00X223+1.09X231+1.09X232+1.09X233
 -MDFCUT2 .EQ. 0

37. 0.71X211+0.71X212+0.71X213+0.37X221+0.37X222+0.37X223+0.29X231+0.29X232+0.29X233
 -MDFCUT2 .EQ. 0

38. 0.34X211+0.45X212+0.56X213+0.34X221+0.45X222+0.56X223+0.34X231+0.45X232+0.56X233
 -MDFL2 .EQ. 0

39. 0.32X211+0.21X212+0.19X213+0.32X221+0.21X222+0.19X223+0.32X231+0.21X232+0.19X233
 -MDFPL2 .EQ. 0

40. 7.09X211+7.09X212+7.09X213+5.43X221+5.43X222+5.43X223+3.55X231+3.55X232+3.55X233
 -PROHRS2 .EQ. 0

41. 3.97X211+3.97X212+3.97X213+5.74X221+5.74X222+5.74X223+6.23X231+6.23X232+6.23X233
-FRUL02 .EQ. 0

42. 4.03X211+4.03X212+4.03X213+2.14X221+2.14X222+2.14X223+1.66X231+1.66X232+1.66X233
-FRUPLW2 .EQ. 0

43. 1.84X211+2.40X212+3.00X213+2.65X221+3.47X222+4.34X223+2.88X231+3.76X232+4.71X233
-TRUCKL2 .EQ. 0

44. 1.75X211+2.26X212+2.71X213+0.89X221+1.14X222+1.42X223+0.65X231+0.83X232+1.03X233
-TRUCKP2 .EQ. 0

45. 0.23X211+0.23X212+0.23X213+0.23X221+0.23X222+0.23X223+0.23X231+0.23X232+0.23X233
-CHSAW12 .EQ. 0

46. 5.71X211+5.71X212+5.71X213+4.42X221+4.42X222+4.42X223+2.86X231+2.86X232+2.86X233
-PROCIH2 .EQ. 0

47. 3.22X211+3.22X212+3.22X213+4.65X221+4.65X222+4.65X223+5.05X231+5.05X232+5.05X233
-FRULI2 .EQ. 0

48. 3.27X211+3.27X212+3.27X213+1.73X221+1.73X222+1.73X223+1.35X231+1.35X232+1.35X233
-FRUPI2 .EQ. 0

49. 1.26X211+1.63X212+2.03X213+1.26X221+1.63X222+2.06X223+1.26X231+1.63X232+2.03X233
-TRUCIH2 .EQ. 0

50. 2.19X311+2.19X312+2.19X313+1.57X321+1.57X322+1.57X323+1.05X331+1.05X332+1.05X333
-MDSHAR3 .EQ. 0

51. 0.69X311+0.69X312+0.69X313+1.00X321+1.00X322+1.00X323+1.09X331+1.09X332+1.09X333
-MDSFWL3 .EQ. 0

52. 0.71X311+0.71X312+0.71X313+0.37X321+0.37X322+0.37X323+0.29X331+0.29X332+0.29X333
-MDSFWP3 .EQ. 0

53. 0.34X311+0.45X312+0.56X313+0.34X321+0.45X322+0.56X323+0.34X331+0.45X332+0.56X333
-MDSLLD3 .EQ. 0

54. 0.32X311+0.21X312+0.19X313+0.32X321+0.21X322+0.19X323+0.32X331+0.21X332+0.19X333
-MDSPLD3 .EQ. 0

55. 10.3X311+10.3X312+10.3X313+7.41X321+7.41X322+7.41X323+4.93X331+4.93X332+4.93X333
-HARHRS3 .EQ. 0

56. 3.78X311+3.78X312+3.78X313+5.46X321+5.46X322+5.46X323+5.93X331+5.93X332+5.93X333
-FRUL063 .EQ. 0

57. 4.03X311+4.03X312+4.03X313+2.14X321+2.14X322+2.14X323+1.66X331+1.66X332+1.66X333
-FRUPLW3 .EQ. 0

58. 1.84X311+2.40X312+3.00X313+2.65X321+3.47X322+4.34X323+2.88X331+3.76X332+4.71X333
-TRUCKL3 .EQ. 0

59. 1.75X311+2.26X312+2.71X313+0.89X321+1.14X322+1.42X323+0.65X331+0.83X332+1.03X333
-TRUCKP3 .EQ. 0

60. 13.3X311+13.3X312+13.3X313+7.00X321+7.00X322+7.00X323+6.35X331+6.35X332+6.35X333
-HARVIN3 .EQ. 0

61. 3.07X311+3.07X312+3.07X313+4.43X321+4.43X322+4.43X323+4.81X331+4.81X332+4.81X333
-FRULI3 .EQ. 0

62. 3.27X311+3.27X312+3.27X313+1.73X321+1.73X322+1.73X323+1.35X331+1.35X332+1.35X333
-FRUPI3 .EQ. 0

63. 1.26X311+1.63X312+2.03X313+1.26X321+1.63X322+2.06X323+1.26X331+1.63X332+2.03X333
-TRUCIH3 .EQ. 0

64. 8.47Y111+8.47Y112+8.47Y113+7.56Y121+7.56Y122+7.56Y123+6.13Y131+6.13Y132+6.13Y133
-MDSCT4 .EQ. 0

65. 1.16Y111+1.16Y112+1.16Y113+1.01Y121+1.01Y122+1.01Y123+0.73Y131+0.73Y132+0.73Y133
-MDSK4 .EQ. 0

66. 1.08Y111+1.40Y112+1.76Y113+1.08Y121+1.40Y122+1.76Y123+1.04Y131+1.37Y132+1.74Y133
-MDSTRL4 .EQ. 0

67. 0.42Y111+0.54Y112+0.54Y113+0.18Y121+0.23Y122+0.23Y123+0.13Y131+0.17Y132+0.17Y133
-MDSCHP4 .EQ. 0

68. 6.58Y111+6.58Y112+6.58Y113+5.75Y121+5.75Y122+5.75Y123+4.18Y131+4.18Y132+4.18Y133
-SKDHRS4 .EQ. 0

69. 5.75Y111+7.52Y112+9.43Y113+5.75Y121+7.52Y122+9.43Y123+5.56Y131+7.35Y132+9.26Y133
-TRLTHR4 .EQ. 0

70. 2.22Y111+2.87Y112+2.87Y113+0.95Y121+1.22Y122+1.22Y123+0.71Y131+0.91Y132+0.91Y133
-TRCHHR4 .EQ. 0

71. 0.78Y111+0.78Y112+0.78Y113+0.78Y121+0.78Y122+0.78Y123+0.78Y131+0.78Y132+0.78Y133
-CHSAW14 .EQ. 0

72. 6.42Y111+6.42Y112+6.42Y113+5.53Y121+5.53Y122+5.53Y123+4.03Y131+4.03Y132+4.03Y133
-SKDIMV4 .EQ. 0

73. 2.06Y111+2.70Y112+3.38Y113+2.06Y121+2.70Y122+3.38Y123+1.99Y131+2.64Y132+3.32Y133
-TRITRL4 .EQ. 0

74. 1.85Y111+2.37Y112+2.37Y113+1.85Y121+2.37Y122+2.37Y123+1.85Y131+2.37Y132+2.37Y133
-TRICHP4 .EQ. 0

75. 0.82Y211+0.82Y212+0.82Y213+0.58Y221+0.58Y222+0.58Y223+0.39Y231+0.39Y232+0.39Y233
-MDSHARS .EQ. 0

76. 0.96Y211+0.96Y212+0.96Y213+0.77Y221+0.77Y222+0.77Y223+0.54Y231+0.54Y232+0.54Y233
-MDSKDS .EQ. 0

77. 1.08Y211+1.40Y212+1.76Y213+1.08Y221+1.40Y222+1.76Y223+1.04Y231+1.37Y232+1.74Y233
-MDSTRL5 .EQ. 0

78. 0.42Y211+0.54Y212+0.54Y213+0.18Y221+0.23Y222+0.23Y223+0.13Y231+0.17Y232+0.17Y233
-MDSCHP5 .EQ. 0

79. 3.69Y211+3.69Y212+3.69Y213+2.73Y221+2.73Y222+2.73Y223+1.81Y231+1.81Y232+1.81Y233
-TRLHARS .EQ. 0

80. 5.46Y211+5.46Y212+5.46Y213+4.38Y221+4.38Y222+4.38Y223+3.10Y231+3.10Y232+3.10Y233
-SKDHRS5 .EQ. 0

81. 5.75Y211+7.52Y212+9.43Y213+5.75Y221+7.52Y222+9.43Y223+5.56Y231+7.35Y232+9.26Y233

-TRLTHRS .EQ. 0

82. 2.22Y211+2.87Y212+2.87Y213+0.95Y221+1.22Y222+1.22Y223+0.71Y231+0.91Y232+0.91Y233
-TRCHHRS .EQ. 0

83. 3.97Y211+3.97Y212+3.97Y213+2.94Y221+2.94Y222+2.94Y223+1.95Y231+1.95Y232+1.95Y233
-RHARINS .EQ. 0

84. 5.23Y211+5.23Y212+5.23Y213+4.20Y221+4.20Y222+4.20Y223+2.97Y231+2.97Y232+2.97Y233
-SKDIMV5 .EQ. 0

85. 2.06Y211+2.70Y212+3.38Y213+2.06Y221+2.70Y222+3.38Y223+1.99Y231+2.64Y232+3.32Y233
-TRITRL5 .EQ. 0

86. 1.85Y211+2.37Y212+2.37Y213+1.85Y221+2.37Y222+2.37Y223+1.85Y231+2.37Y232+2.37Y233
-TRICHP5 .EQ. 0

87. FRUL061+FRUL062+FRUPLW1+FRUPLW2+FRUL063+FRUPLW3 .GE. 300000

88. MDSCT1+MDSCT2+MDSCT4 .GE. 200000

RMG09J
RMGRHS
OPTIMIZE
MPOS VERSION 3.2 NORTHWESTERN UNIVERSITY

PUUNKÄSITTELYASEMAN PERUSTAMISEN KANNATTAVUUS

Esko Mikkonen

Tässä tutkimuksessa sovellettu matemaattisen ohjelmoinnin analyysitekniikka osoittautui käyttökelpoiseksi vaihtoehtojen vertailumenetelmäksi.

Kokopuuta käsittelevän terminaalin perustaminen olisi Etelä-Suomen olosuhteissa kannattavaa, sillä varovasti arvioituna se tuottaisi siihen sijoitetun rahamäärän takaisin muutamassa vuodessa. Terminaalin vuosikapasiteetiksi 2-vuorotyössä, jota ehdottomasti tulisi käyttää, kannattaisi rakentaa vähintään 180 000 m³ runkopuuta. Terminaalin tulisi sijaita siten, että se pystyisi syöttämään joustavasti joko yhtä integraattia tai useita ko. alueen raaka-ainetta käyttäviä tehdaslaitoksia.

Edullisin korjuumenetelmä olisi kaato-kasauskoneeseen ja pihtijuontotraktoriin perustuva. Kokopuiden kaukokuljetus tapahtuisi taloudellisimmin pylväsaudesta kehitetyllä muunnoksella, joka olisi varustettu autokohtaisella kuormaimella. Kuljetusmenetelmän käyttämiseen liittyy joukko teknisiä ongelmia, jotka on ensin ratkaistava.

Runkoina korjuu ei ole kannattavaa, sillä rungoista saatava apteraushyöty yksin ei riitä kattamaan terminaalin lisäkustannuksia.

Kokopuutermiinaali toisi kustannussäästöä puun korjuussa, kuljetuksessa ja tehdaskäsittelyssä. Polttoon saatavan lisäraaka-aineen tuomat energiakustannusten säästöt olisivat 4,5-kertaiset korjuukustannusten säästöön verrattuna edellyttäen, että lämpöenergia voidaan käyttää hyväksi. Kokonaiskustannusten nettosäästöt perinteisiin menetelmiin verrattuna olisivat 5–6 % terminaalin käsittelemälle puumäärälle. Terminaalin kannattavuus ei ole erityisen herkkä korjattavan puuston koon vaihtelulle tarkastellun järeiden puitteissa.

Kokopuutermiinaalin kanssa lähes yhtä edullisen jatkotutkimusten arvoisen potentiaalisen vaihtoehdon muodostaa puunkorjuu tukkiosamenetelmällä ja metsätähteiden haketus tai murskaus tienvarsivarastolla energiahakkeeksi sekä sen kuljetus polttohakkeeksi.

Jatkotutkimukset tulisikin kohdistaa ennen muuta kaato-kasaus-pihtijuontokone-korjuuketjun kokeiluun sekä pylväsauston kehittämiseen kokopuiden kaukokuljetukseen soveltuvaksi. Myös terminaalin toteutustekniikka vaatinee lisäselvityksiä. Tuloksia arvioitaessa on erityisesti painotettava seikkaa, että talteen saatavalle metsätähteelle ei esimerkitapauksessa ole oletettu mitään kantohintaa.

1 JOHDANTO	97
1.1 Yleistä	97
1.2 Tutkimusongelma	97
2 SYSTEEMIANALYYSIN KÄYTÖN PERUSTEET	98
3 MALLIN RAKENNE JA RAJOITUKSET	99
4 ESIMERKKILASKELMAN PERUSTEET	101
4.1 Yleistä	101
4.2 Tarkasteltavan alueen puuvarat	101
4.3 Korjuumenetelmät	102
4.4 Puutavaran kuormaus metsävarastolla	104
4.5 Kaukokuljetuksen ja puunkäsittelyn vaihtoehdot	104
4.5.1 Kaukokuljetus	104
4.5.2 Puiden käsittelyasema tai terminaali	104
5 KESKEISET TULOKSET	105
5.1 Edullisimmat korjuumenetelmät	105
5.2 Työvuorojen lukumäärän vaikutus	106
5.3 Herkkyysanalyysit	106
6 PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET	110

1 JOHDANTO

1.1 Yleistä

Perinteisten puunkorjuumenetelmien perusteiden kritiikkiä on alkanut viime vuosina esiintyä pohjoismaissa yhä enemmän. Ruotsi ja Suomi ovatkin maita, joissa tavaralajimenetelmät ovat saavuttaneet lähes täydellisen valta-aseman. Muualla maailmassa runkomenetelmät ovat vallitsevia ja tavaralajimenetelmät vain suhteellisen suppeassa käytössä. On herätty kysymään, onko edelleenkin taloudellisesti perusteltua kulkea muusta maailmasta poikkeavaa tietä puunkorjuun menetelmä- ja konekehittelyssä. Ongelman syntymiseen on vaikuttamassa useita syitä, joista tärkeimmät ovat:

Teollisuuden kapasiteettiin verrattuna raaka-ainepohja ei ole laajentunut samaa vauhtia. Siitä seuraa, että saatavilla oleva puurakka-aine on käytettävä hyväksi mahdollisimman tarkkaan. Lähinnä öljystä saadun energian hinnan moninkertaistuminen viime vuosikymmenellä pakotti etsimään uusia ja varmempia, hinnan vaihteluille vähemmän alttiita ja halvempia energialähteitä. Yhdeksi tällaiseksi havaittiin metsätähteet ja niiden hyväksikäyttö. Mittaus- ja tietojenkäsittelytekniikan viimeaikainen kehitys on mahdollistanut puun entistä tarkemman ja nopeamman mittaamisen jalostuspaikalla. Näitä tietoja voidaan käyttää prosessiin ohjauksessa samanaikaisesti jalostustapahtuman kestäessä siten, että tuotteesta saatava hyöty on mahdollisimman suuri. Mainittujen kehityslinjien perusteella on alettu pohdiskella uudelleen kokopuu- ja runkomenetelmien käyttömahdollisuuksia varsinkin järeän puun korjuussa: Missä olosuhteissa ne tulisivat ta-

loudellisesti kannattaviksi ja millaisia niiden tulisi olla? Koska ne joka tapauksessa vaatisivat lähes koko nykyisen korjuumenetelmä-rakenteen muuttamista, seikkaperäinen tutkimus- ja kehittämistyö on tarpeen.

1.2 Tutkimusongelma

Tässä työssä selvitetään kokopuiden tai -runkojen käsittelyyn tehtaalla tai erillisellä terminaalilla perustuvia järeän puun korjuu-, kaukokuljetus- ja käsittelyjärjestelmiä ja niiden perusteita. Johtoajatuksena on, että jollain alueella olevat järeät puutavarat voitaisiin mahdollisimman tarkoituksenmukaisesti käyttää hyväksi teollisuudessa. Myös tähän asti metsään hakkuun jälkeen jääneet metsätähteet sekä prosessien sivutuotteina syntyvät rejektit pyritään hyödyntämään mahdollisimman tarkoin energian tuotannossa ja siten vähentämään riippuvuutta tuontipoltoaineista. Pyrkimyksenä on myös ollut selvityksen laatiminen siitä, mikä taloudellinen merkitys runkojen tai kokopuiden optimaalisella jakamisella puutavaralajiksi on silloin, kun kokonaisuuden kannalta toimitaan taloudellisimmalla tavalla.

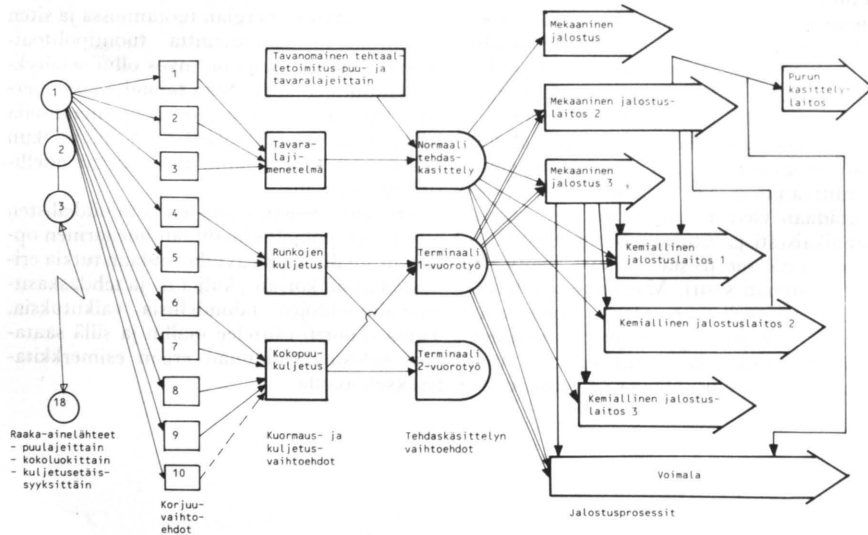
Tuotannollisten, teknisten ja taloudellisten selvitysten pohjalta laaditaan lineaarinen optimointimalli, jonka avulla voidaan tutkia erilaisten puun korjuu-, kuljetus- ja tehdaskäsittelyvaihtoehtojen taloudellisia vaikutuksia. Tämä raportti esittelee mallin ja sillä saatavien tulosten tulokunnan erään esimerkkitaupauksen avulla.

2 SYSTEEMIANALYYSIN KÄYTÖN PERUSTEET

Puun korjuun ja kaukokuljetuksen sekä hankitun puutavaran tehdaskäsittelyn voidaan ajatella muodostavan metsäteollisuustuotteiden esijalostusketjun, joka alkaa kannolta ja päättyy lopputuotteena tehtaalla. Jalostusketjun eri vaiheet vaikuttavat toisiinsa, sillä niissä syntyy välituotteita ja rejektejä, joita voidaan käyttää raaka-aineena eri jatkojalostusprosesseissa tehtaalla. Näin on varsinkin tapauksessa, jossa tehdas on rakenteeltaan integraatti, joka pystyy periaatteessa jalostamaan kaikki alueen metsävarojen rakenteen mukaiset raaka-ainevarat. Toisaalta myös tehdaslaitoksista erillään sijaitseva terminaali voi tulla kysymykseen edellyttäen, että jatkokuljetukset eri jalostuslaitoksille voidaan hoitaa keskitetysti ja järkevästi. Perinteisesti melko itsenäistä puuta tilausten mukaisesti toimittavaa metsäosastoa on omiaan lähentämään tehdaskäsittelyn kanssa se seik-

ka, että raaka-aineesta on nykyisin saatava irti maksimaalinen tuotto ja että aiemmin liian kalliina ja siksi hyödyttömänä metsään jätetyille metsätähteille on syntymässä kilpailukykyistä käyttöarvoa energiantuotannon raaka-aineena. Erilaiset sopimukset, tekniset rajoitukset, lait ja asetukset, tuotannon vaatimukset ja eri tuotteiden käsittelyn ja jalostamisen vaihtelevat kustannukset luovat vaihtoehdot toimintavaihtoehtojen valinnalle.

Kuvattaessa puuraaka-aineen virtausta jalostusketjun läpi systeemimallin avulla voidaan ongelman matemaattiseen käsittelyyn ja hallintaan käyttää lineaarista mallia. Mallissa minimoidaan syntyviä puunkorjuun ja -tehdaskäsittelyn kokonaiskustannuksia. Kuvassa 1 on esitetty esimerkkitapauksessa käytetyt raaka-aineiden mahdolliset kulkuvirrat kaavion avulla.



Kuva 1. Esimerkkitalpausten puuraaka-ainevirtojen kulkukaavio.

3 MALLIN RAKENNE JA RAJOITUKSET

Matemaattisesti lineaarisen optimoinnin ongelma voidaan kuvata esimerkiksi matriisialgebran avulla seuraavasti:

$$\begin{aligned} \text{Minimoi} \quad & Z = \mathbf{c}^T \mathbf{x} \\ \text{rajaehtojen} \quad & \mathbf{Ax} = \mathbf{b} \\ & \mathbf{x} \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

vallitessa.

Yhtälöissä \mathbf{x} on $n \times 1$ muuttujavektori, jonka kustannuskerroinvektori on \mathbf{c}^T . Rajahtovektori on $m \times 1$ vektori \mathbf{b} ja $m \times n$ matriisi \mathbf{A} muodostaa ongelman teknisten kerrointen matriisin.

Käsiteltävänä olevassa ongelmassa matriisi \mathbf{A} on kolmiosainen. Yhden osan muodostavat puuraaka-aineen saatavuus rajoituksiin ja puuvirran yhdistelmät joko tienvarsivarastolla tai tehtaalla.

Saatavuusrajoitukset ovat muodoltaan seuraavat:

$$\sum_{n=1}^3 \sum_{m=1}^3 \sum_{l=1}^9 x_{ijklmn} \leq b_{ijk} \quad (2)$$

jossa i = puun kokoluokka $i = 1 \dots 6$
 j = kuljetusasetäisyys $j = 1 \dots 3$
 k = puulaji $k = 1 \dots 3$
 l = korjuumenetelmä
 m = kaukokuljetusmenetelmä
 n = tehdaskäsittelyn vaihtoehto
 b_{ijk} = saatavilla oleva enimmäispuumäärä kokoluokittain, kuljetusasetäisyksittäin ja puulajeittain

Puumääräyhdistelmät muotoillaan tasapainoyhtälöiden muotoon

$$\sum_{i=1}^6 x_{ijkl} - S_{ijk} = 0 \quad (3)$$

jossa muuttuja S_{ijk} edustaa rungonkokoluokat yhdistäen saatua puumäärää tienvarsivarastolla. Kaikki tarvittavat yhdistelmät voidaan muotoilla vastaavalla tavalla. Näissä rajoitusyhtälöissä muuttujien kertoimet matriisissa \mathbf{A} ovat ykkösiä.

Kerroinmatriisin \mathbf{A} toisen osan muodostavat tekniset rajoitusyhtälöt. Näitä ovat esi-

merkiksi kunkin korjuumenetelmän tarvitsema konetyöpanos koneittain, ihmistyöpanos, investointipanos tai mikä tahansa muu relevantti resurssirajoitus. Kyseinen tekijä on ilmaistava puukuutiota kohti, koska päätösmuuttujana on kuutiometri raaka-ainetta. Tällainen rajoitusyhtälö voi olla tyypiltään \leq , $=$, \geq tai merkiltään rajoittamaton. Esimerkkinä korjuumenetelmän 1 tarvitsema konetyöpanos kuutiometriä kohti

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^9 a_{ijkl} x_{ijkl} \leq b_p \quad (4)$$

jossa a_{ijkl} = korjuumenetelmän 1 tarvitsema konetyöpanos kuutiometriä kohti jotain konetta p käytettäessä

b_p = panoksen rajamäärä

Kaikki tekniset kertoimet voidaan muotoilla vastaavalla tavalla.

Matriisin \mathbf{A} kolmannen osamatriisin muodostavat käsittelyaseman tai terminaalin sekä jalostusprosessin rajoitukset tai vaatimukset. Tasapainoyhtälöiden (5) avulla saadut puumääräsummat S_{ijk} jaetaan eri prosessoille.

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 S_{ijk} - \sum_{u=1}^n K_u P_u = 0 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_u &\geq T_u \\ K_u &\leq 1 \end{aligned}$$

Jossa T_u on prosessin u tuotantotavoite, K_u sen raaka-ainemääräkerroin ja P_u tarvittava raaka-ainemäärä.

Mallin muuttujajoukon, kuten jo mainittiin, (\mathbf{x} -vektori) muodostavat eri raaka-ainelähteistä saatavat puumäärät, joiden käsittely-yksikkönä oli metsävaiheessa kuorellinen kiintokuutiometri runkopuuta. Kokopuumenetelmien osalta lähtökohdana oli myös runkopuukuutiometri, mutta puulajeittain käytettiin seuraavia suhdelukuja talteen saatavaa kokonaisbiomassaa laskettaessa: kuusi 1,25, mänty ja koivu 1,22. Runkopuumäärä jaettiin mallissa eri kokoluokittain tukki- ja

kuitupuuhun seuraavan asetelman mukaisesti.

D _{1,3} cm	Koko luokka	Mänty		Kuusi		Lehtipuu	
		Tukkia	Kuitua	Tukkia	Kuitua	Tukkia	Kuitua
16,5-19,5	1	15	85	4	96	0	100
19,6-24,5	2	47	53	22	78	22	78
24,6-29,5	3	74	26	53	47	51	49
29,6-34,5	4	88	12	78	22	73	27
34,6-39,5	5	91	9	88	12	82	18
+39,5	6	91	9	88	12	80	20

Kuitupuu ja tukki ohjattiin esimerkkitapauksessa kuvan 1 (s. 98) mukaisesti eri prosesseihin ja prosessin kulutuslukujen suhteessa syntyneet tuotteet joko poistuivat lopputuotteena prosessista tai ohjattiin edelleen jatkojalostukseen kullekin laitokselle asetetun tuotantotavoitteen saavuttamiseksi. Kuori ja jalostusprosessien rejektit ohjattiin voimaalaan energiatuotantoon kuten myös terminaaliin tuleva metsätähdehake. Voimalaitokselle ei asetettu mitään tuotantotavoitetta, vaan malli antoi tuloksena kuoren, metsätähteiden ja rejektien tuottaman energiamäärän.

Mallin rajoituksina (b-vektori) ovat saattavat enimmäispuunmäärät, korjuu- ja kuljetusmenetelmien tekniset ja tuotantolliset rajoitukset, terminaalin kapasiteettirajoitukset ja tuotantovaatimukset.

Minimoitavat tavoitefunktiot muodostuvat korjuukustannuksista, kuormauskustannuksista, kaukokuljetuskustannuksista ja tehdas- ja terminaalikäsittelyn kustannuksista. Vaihtoehtoisia tavoitefunktioita voidaan sisällyttää yhteensä kuusi ja kussakin käsittelyasemaa tai terminaalia voidaan tarkastella kahdella erilaisella vuosikapasiteettitasolla. Kuoren ja metsätähteiden avulla generoidun

energian hyötyshintana on mahdollista pitää raskaan polttoöljyn, turpeen tai kivihiilen hintaa. Muita jalostuskustannuksia kuin puun vastaanottokäsittely- ja terminaalikustannukset ei malliin sisälly.

Vaihtoehtoiset tavoitefunktiot olivat esimerkkitaapauksessa:

- I Korjuumenetelmät kuten kappaleessa 4.3 (s. 102) on kuvattu. Kaiken puutavaran autoonkuormaus autokohtaisella kuormaimella. Tavaralajien kaukokuljetus täysperävaunuautolla, runkojen ja kokopuiden kaukokuljetus pylväsautomuunnelmalla.
- II Korjuumenetelmät kuten I:ssä. Kuormaus autokohtaisella kuormaimella kaikissa menetelmissä. Tavaralajien kaukokuljetus täysperävaunuautolla, runkojen ja kokopuiden kuljetus erityisrakenteisella kokopuuautolla.
- III Korjuumenetelmät kuten I:ssä. Kuormaus erillisellä autokuormaimella. Kaukokuljetus kuten I:ssä.
- IV Korjuumenetelmät kuten I:ssä. Kuormaus erillisellä autokuormaimella. Kaukokuljetus kuten II:ssä.
- V Korjuumenetelmät kuten I:ssä. Tavaralajien kuormaus autokohtaisella kuormaimella runkojen ja kokopuiden kuormaus pyörärakenteisella etukuormaajalla. Tavaralajien kaukokuljetus täysperävaunuautolla, runkojen ja kokopuiden kaukokuljetus pylväsautomuunnelmalla.
- VI Korjuumenetelmät kuten I:ssä. Kuormaus kuten tavoitefunktiossa V. Tavaralajien kaukokuljetus täysperävaunuautolla, runkojen ja kokopuiden kuljetus erikoisrakenteisella kuorma-autolla.

Mallin avulla tapahtuneen tarkastelun perimmäisenä tavoitteena oli ohjata puuvirta eri tavoitefunktioiden tasoilla siten, että asetetut tuotantotavoitteet toteutetaan kustannukset minimoiden. Malli siis "perustaa" terminaalin, jos se kokonaiskustannusten kannalta on edullista ja "hankkii" sinne puun edullisimmista olosuhteista.

4 ESIMERKKILASKELMAN PERUSTEET

4.1 Yleistä

Optimointilaskelman suorittamista varten kerättiin tarkastelun kohteena olevia menetelmiä koskeva perustietous tuotosten, työpanosten ja kustannusten osalta vuoden 1981 tasolla. Lähteenä käytettiin sekä kotimaisten että ulkomaisten tutkimuslaitosten julkaisemia tuotostietoja, tärkeimpinä Metsätehon tutkimustulokset. Hakkuun, metsäkuljetuksen ja autokuljetuksen taksat niiltä osin kuin ne olivat sovellettavissa, olivat kustannuserusteina. Menetelmille, joille ei ole olemassa taksoja, tehtiin kustannuslaskelmat räätiläntyönä ko. olosuhteisiin.

Tarpeelliset muuntoluvut saatiin Metsäntutkimuslaitoksen ja Oy Keskuslaboratorion tutkimusjulkaisuista.

Esimerkkitaapauksen lineaarimallin koko ja rakenne muodostui seuraavaksi:

	kpl	ei-nolla-alkioita, kpl	ei-nollia keskim./rivi
Rivityyppi			
yhtä suuri kuin	165	2 492	15,1
pienempi kuin	102	8 257	80,9
suurempi kuin	10	12	1,2
vapaita	6	5 076	846,0
Yhteensä ja keskim.	283	15 837	55,9
Saraketyyppi			
suurempi kuin	113	462	4,1
rajaväli	867	15 375	17,7
Yhteensä ja keskim.	980	15 837	16,2
RHS-sarakkeita	1	114	114,0

Mallin tiheys oli keskimäärin varsin korkea, 5,7 %.

Mallia voidaan luonnehtia pienehköksi keskikokoiseksi malliksi, jonka ratkaiseminen nykyisillä tietokoneilla käy vaivattomasti.

4.2 Tarkasteltavan alueen puuvarat

Terminaalia koskevaa selvitystä varten asetettiin lähtökohdaksi, että terminaalille toimitettavien leimikoiden rakenteen tulee täyttää seuraavat vaatimukset.

- Vain päätehakuuleimikot tulevat kysymykseen
- Valtapuulajin osuuden tulee olla mahdollisimman suuri
- Leimikot saavat sijaita enintään 100 km:n keskimääräisen kuljetusmatkan päässä
- Leimikon rungon keskikoon tulee olla vähintään 200 dm³

Laskelmia varten tarvitaan arvio järeän puun määrästä, joka olisi alueelta terminaalille saatavissa. Arviossa voidaan ottaa huomioon seikka, että suinkaan kaikki puu ei ole yhden käyttäjän hankittavissa. Laskelmissa voidaan käyttää kuljetusetäisyyden mukaan vaihtelevia osuuksia esimerkiksi seuraavasti.

	Keskim. kuljetusetäisyys, km		
	20	50	75
Suht. osuus	50 %	40 %	30 %

Taulukossa 1 on puulajeittain, kokoluokittain ja kuljetusetäisyyksittäin esitetty puumäärien osuudet, jotka esimerkkilaskelman eteläsuomalaiselle terminaalille saatiin.

Rungon kokoluokitus on seuraava.

	Rinnankorkeusläpimitta, cm					
	16,5 - 19,5	19,6 - 24,5	24,6 - 29,5	29,6 - 34,5	34,6 - 39,5	39,6 +
Koko luokka	1	2	3	4	5	6

Vastaava tilavuus, m ³ /runko	Rinnankorkeusläpimitta, cm					
	16,5 - 19,5	19,6 - 24,5	24,6 - 29,5	29,6 - 34,5	34,6 - 39,5	39,6 +
	0,190	0,335	0,560	0,840	1,150	1,550

Taulukko 1. Esimerkkilaskelman kuljetusetäisyyksittäin, kokoluokittain ja puulajeittain saatavilla olevien puumäärien osuudet.

Puun kokoluokka	Kuusi			Mänty			Koivu			Summat kokoluokittain		
	Etäisyysluokka			Etäisyysluokka			Etäisyysluokka			Kuusi	Mänty	Koivu
	1	2	3	1	2	3	1	2	3			
	Suhteellinen osuus, %											
1	0,25	1,29	2,17	0,08	0,39	0,65	0,03	0,17	0,28	3,71	1,12	0,48
2	1,60	8,02	13,55	0,48	2,41	4,06	0,21	1,03	1,74	23,17	6,95	2,98
3	1,46	7,29	12,31	0,43	2,79	3,10	0,19	0,94	1,58	21,06	6,32	2,71
4	0,88	4,41	7,45	0,26	1,32	2,24	0,11	0,57	0,96	12,74	3,82	1,64
5	0,40	2,11	3,55	0,12	0,63	1,07	0,05	0,27	0,46	6,06	1,82	0,78
6	0,22	1,15	1,89	0,07	0,34	0,56	0,03	0,15	0,23	3,26	0,97	0,41
Yht.	70			21			9			100		

Kokoluokitus ei näin ollen edusta leimikoita rungon keskipakoa, vaan sitä, kuinka paljon ko. järeiden mukaista puustoa alueella kaikkiaan on ja tulisi terminaalle, mikäli saatavilla oleva puumäärä korjattaisiin.

Taulukon 1 luvut on saatu kuljetusetäisyyksittäin siten, että 35 km:n etäisyydelle terminaalin sijaintipaikasta piirretyn ympyrän alalla olevien leimikoiden on ajateltu olevan keskimäärin 20 km:n kuljetusetäisyyden (etäisyys 1) päässä, 35 km:n ja 65 km:n säteillä olevan ympyrän renkaan alueella olevat leimikot ovat keskimäärin 50 km:n etäisyydellä (etäisyys 2) ja 65–100 km:n renkaalla sijaitsevat leimikot keskimäärin 75 km:n kuljetusetäisyydellä (etäisyys 3). Näin ilmoitettuna taulukon kullakin etäisyydellä sijaitsevan puumäärän osuus ei sisällä lyhyemmän etäisyyden puumäärää.

Kolmen puulajin, kuuden eri kokoluokan ja kolmen keskimääräisen kuljetusetäisyyden tarkastelu muodostaa siten yhteensä 56 eri puuraaka-ainelähdettä, joista malliin otetaan raaka-ainetta vallitsevien rajoitusten puitteissa.

Energian tuotannon tarpeisiin mallissa arvioidaan saatavan kokopuunmenetelmiä käytettäessä 25 % enemmän kuusi-, 22 % enemmän mänty- ja lehtipuubiomasaa, joka lisämäärä koostuu latvoista, oksista sekä niiden kuoresta ja neulasista. Laskelmissa käytetyt kuoriosuudet puulajeittain olivat: kuusi 11,4 %, mänty 12 % ja lehtipu 13 %. Vertailun runko- ja puunmenetelmissä oletettiin optimaalisen apterauksen ansiosta saatavan 2 %:n raaka-ainehyöty runkopuulle.

4.3 Korjuumenetelmät

Mallin avulla tapahtuvaan vertailuun haluttiin sisällyttää myös tärkeimmät tavaralajikorjuun menetelmät, jotka ovat:

1. Ihmistyövaltainen hakkuu suorintaa käyttäen
 2. Miestyönä tehtävään erilliskaatoon ja isoon perustoriin perustuva korjuumenetelmä
 3. Harvesteriin perustuva korjuumenetelmä
- Näissä kaikissa metsäkuljetus tapahtuu kuormaa kantavalla metsätraktorilla ja kaukokuljetus täysperävaunautolla.

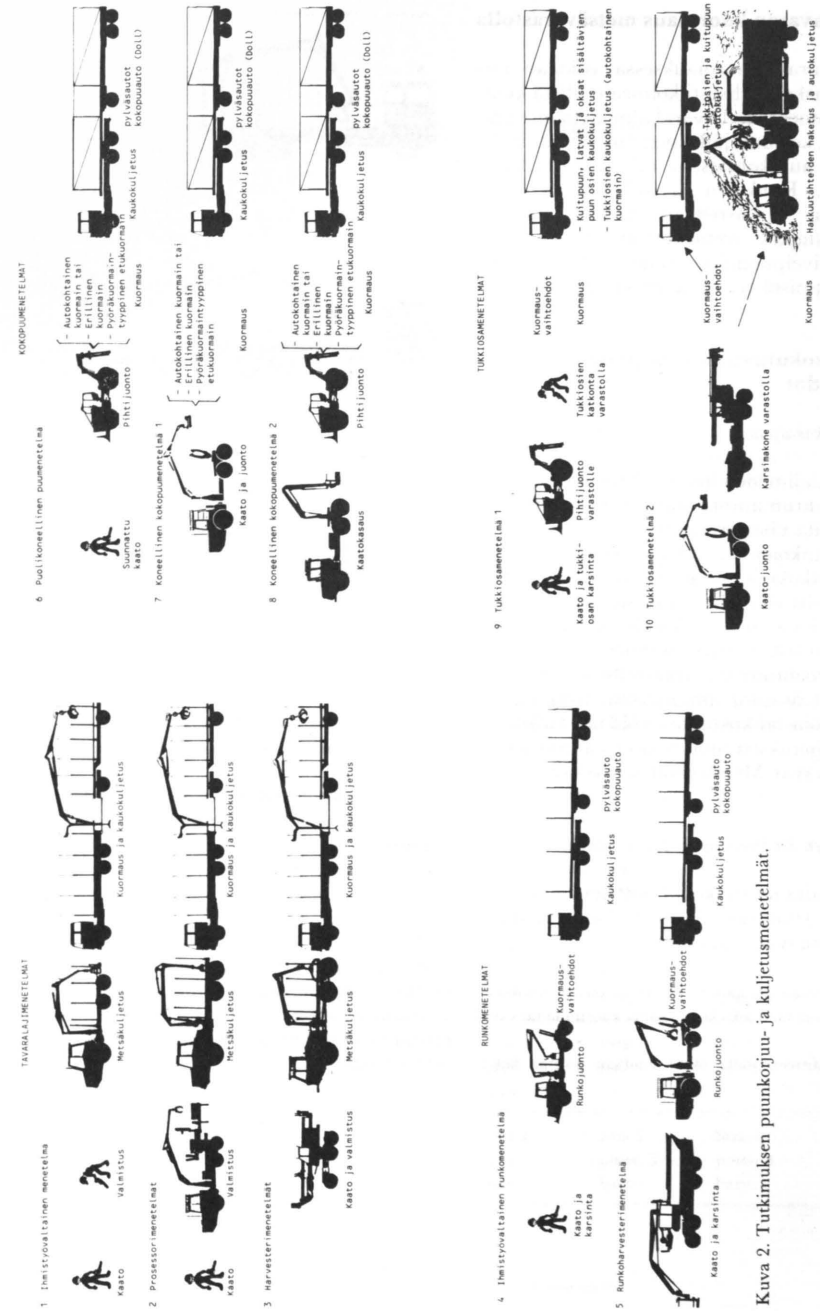
Runkomenetelmiä on tarkasteluissa mukana kaksi:

4. Ihmistyönä tehtävään kaatoon ja karsintaan sekä puristuspankkojuontoriin perustuva menetelmä
5. Runkoharvesteriin ja puristuspankkotraktoriin perustuva menetelmä.

Kokopuunakorjuun menetelmiä on mukana yhteensä viisi, joista kaksi oli nk. tukkiosatai osapuunmenetelmiä. Kokopuunmenetelmät ovat:

6. Erilliskaatoon ihmistyönä ja pihtijuontotraktoriin perustuva menetelmä
7. Kaato-juontokoneeseen perustuva menetelmä
8. Kaato-kasauskoneeseen ja pihtijuontotraktoriin perustuva menetelmä
9. Puiden suunnattu kaato ja tukkiosan karsinta ihmistyönä, metsäkuljetus pihtijuontotraktorilla ja tukkiosan katkenta moottorisahalla varastolla
10. Kaato-juontokone ja tienvarsivarastolla toimiva puomikarsimakone, joka karsii puut ja lajittelee tukki- ja kuitupuuosan.

Korjuumenetelmät on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Tutkimuksen puunkorjuu- ja kuljetusmenetelmät.

4.4 Puutavaran kuormaus metsävarastolla

Puutavaran kuormauksessa voidaan tarkastella laskennallisesti kolmea erillistä kuormausvaihtoehtoa. Tavaralajimenetelmillä tapahtuvan korjuun jälkeinen autoonkuormaus tapahtuu autokohtaisella tai erillisellä kuormaimella. Runkojen ja kokopuiden kuormauksessa tarkastellaan kolmea erillistä kuormaustapaa: autokohtaista kuormainta, erillistä nivelpuomikuormainta sekä etukuormaajatyypistä pyöräkuormaajaa.

Autokohtainen kuormain



Erillinen kuormain



Pyörärakenteinen etukuormain



Vein rungot ja kokopuut

Kuva 3. Puutavaran kuormauksen vaihtoehdot.

4.5 Kaukokuljetuksen ja puun käsittelyn vaihtoehdot

4.5.1 Kaukokuljetus

Tavaralajimenetelmien jälkeinen autokuljetus tapahtuu autokohtaisella kuormaimella varustetulla täysperävaunuautolla.

Kokorunkojen ja kokopuiden sekä tukki-osien kaukokuljetusvaihtoehtoina tarkastellaan erityisrakenteista kokopuuautoa. Siinä on otettu huomioon uuden tieliikennelain sallima 48 t:n kokonaispaino. Toisena kaukokuljetusvaihtoehtona on tarkasteltu sellaista oletettua pylväsaution muunnosta, jolla järeitä kokorunkoja tai kokopuita voidaan kuljettaa. Kaukokuljetuksen tuotos- ja kustannusperusteet pohjaavat Metsätehon selvityksiin.

4.5.2 Puiden käsittelyasema tai terminaali

Kokopuita tai runkoja käsittelevän aseman oletetaan sisältävän laitteet, joilla voidaan tehdä seuraavat toiminnot:

- Puiden vastaanottopöytä, johon saapuvat autokuormat tyhjennetään joko kokonaisina kuormina tai yksin puin
- Karsintalaitteet, joilla oksat voidaan poistaa kokopuista

- Oksa- ja latvaraaka-aineen haketuslaitteet energiahakkeen tuottamiseksi
- Mahdollinen selluhakkeen seulontalaitteisto
- Runkopuun optimaalisen pituusasteerauksen laitteet
- Tarvittavat kuljettimet sekä laitteet syntyvän välituotteen edelleen käsittelemiseksi jatkokuljetusta tai integrointiin syöttämistä varten.

Terminaalia voidaan käyttää laskennallisesti sekä yksi- että kaksivuorotyössä. Kaksivuorotyössä kapasiteetti on kaksinkertainen yksivuorotyöhön verrattuna, mutta kiinteät kustannukset vain puolet yksivuorotyön kustannuksista.

5 KESKEISET TULOKSET

5.1 Edullisimmat korjuumenetelmät

Verrattuna tavanomaiseen korjuuseen terminaalin aikaansaamat puun korjuun, kuljetuksen ja käsittelyn suhteelliset kustannussäästöt terminaalin kaksivuorotyössä käsittelemää puukuutiometriä kohti olisivat tavoitefunktioittain seuraavan asetelman mukaiset:

	Vaihtoehto					
	I	II	III	IV	V	VI
Suhteellinen kustannussäästö, %	5,8	6,0	6,9	5,6	6,3	6,1
Vaihtoehtojen edullisuusjärjestys	1.	4.	6.	5.	3.	2.
Suht. keskim. kust. edullisimpaan verrattuna	100,0	103,7	132,8	129,1	101,7	101,4

Taulukossa 2 on esitetty korjuumenetelmät, jotka eri kuljetusmatkoilla ja puunkoko-

luokissa tulevat käyttöön edullisimmassa vaihtoehdossa, joka on tavoitefunktion I mukainen vaihtoehto.

Esimerkkilaskelman mukaisissa olosuhteissa olisi kokonaiskustannusten kannalta edullista perustaa terminaali ja käyttää sitä ainakin kahdessa vuorossa. Tämä voitaisiin tehdä riippumatta siitä, mikä tavoitefunktiovaihtoehto on tarkastelun kohteena. Puunkorjuun tulisi tapahtua terminaalille toimitettavien puiden osalta kaato-kasauskoneeseen ja pihti-juontotraktoriin perustuvaa korjuuketjua käyttäen ja kokopuut kuormata autokohtaisella kuormaimella. Runkomenetelmät eivät tulisi käyttöön. Kaukokuljetuksesta huolehtisi nykyisistä pylväsaautoista kehitelty puoliperävaunuyhdistelmä.

Kaukokuljetuksen hoitaminen erityisrakenteisella kokopuuautolla maksaisi 4,2 % enemmän kuin edullisin vaihtoehto.

Kuormauksen kustannusten vuoksi tavoitefunktioiden III ja IV kokonaiskustannukset

Taulukko 2. Puulajeittainen korjuuketjujen edullisin jakautuminen etäisyyden ja kokoluokan mukaan (terminaali käy 2 vuorossa).

Puulaji	Etäisyysluokka	Puun kokoluokka					
		1	2	3	4	5	6
		Edullisin menetelmä					
Kuusi	1	pros.	pros.	pros.	pmen 3	pmen 3	pmen 3
	2	pros.	pros.	pros.	harv.	pmen 3	pmen 3
	3	pros.	pros.	pros.	harv.	pmen 3	pmen 3
Mänty	1	tosa 1	tosa 1	tosa 1	tosa 1	pmen 3	pmen 3
	2	ihm.	pros.	pros.	pmen 3	pmen 3	pmen 3
	3	ihm.	pros.	pros.	-	-	-
Koivu	1	tosa 1	tosa 1	tosa 1	tosa 1	tosa 1	tosa 1
	2	ihm.	ihm.	ihm.	pmen 3	pmen 3	pmen 3
	3	ihm.	ihm.	ihm.	harv.	harv.	ihm.

ihm. = ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä (korjuuketju 1)

pros. = prosessoriin perustuva tavaralajimenetelmä (korjuuketju 2)

harv. = harvesteriin perustuva tavaralajimenetelmä (korjuuketju 3)

pmen 3 = kaato-kasauskoneeseen ja pihti-juontotraktoriin perustuva korjuumenetelmä (korjuuketju 8)

tosa 1 = ihmistyövaltainen tukkiolosamenetelmä (korjuuketju 9)

ovat muiden vaihtoehtojen kustannuksia selvästi suuremmat. Näissä vaihtoehtoissa myös tavaralajien kuormausta tehtiin erillisellä autokuormaimella.

Terminaalin yläkororajaksi esimerkkilaskelmassa oli aluksi asetettu 150 000 m³ kuorellista runkopuuta kahdessa vuorossa. Näin ollen energian tuotantoon saatavaa metsätähdehaketta syntyy vuosessa 36 165 m³.

Kuoren, metsätähteiden ja terminaalissa syntyvien jätteiden avulla voitaisiin tuottaa yhteensä 290 000 gigajoulea (GJ) energiaa, joka vastaa noin 7 850 tonnia raskasta polttoöljyä ja jonka hintaan (930 mk/t) laskettuna ko. energiamäärän arvo on 7,44 milj. mk. Kivihiileen verrattuna vastaava arvo on 5,65 milj. mk.

5.2 Työvuorojen lukumäärän vaikutus

Mikäli terminaalilla käytettäisiin kaksivuorotyön sijasta vain yksivuorotyössä, kohoaisivat kokonaiskustannukset eri tavoitefunktioiden tasoilla seuraavan asetelman mukaisesti:

Tavoitefunktio	Edullisuusjärjestys	Lisäkustannukset, % 2-vuorotyöhön verrattuna
Vaihtoehto I	1.	19,6
Vaihtoehto II	2.	16,0
Vaihtoehto III	5.	12,9
Vaihtoehto IV	6.	11,0
Vaihtoehto V	4.	18,3
Vaihtoehto VI	3.	16,1

Kokonaiskustannusten kannalta olisi edullisinta käyttää myös 1-vuorotyössä samoja korjuu- ja kuljetusmenetelmiä kuin 2-vuorotyössäkin. Kokonaiskustannukset kohoavat kaikissa vaihtoehtoissa. Tämä johtuu siitä, että energiaksi saatava biomassa pienenee ja sen aiheuttama hyvytys vähenee.

Terminaalille toimitettava puumäärä käy esille taulukosta 4. Korjuu-, kuljetus- ja käsittelykustannusten nettosäästöt olisivat keskimäärin 45 % kaksivuorotyön kustannussäästöistä kuutiota kohti laskettuna.

Terminaalin yläkororaja yksivuorotyössä oli aluksi 75 000 m³. Terminaalille tulee tässä tapauksessa noin 28 100 m³ metsätähdettä, jonka generoima energiamäärä on 143 000

Taulukko 3. Kaksivuorotyössä käytettävälle terminaalille tuleva puumäärä puutavaralajeittain optimaalisessa ratkaisussa.

Puulaji	Tukkia	Kuitua	Yhteensä runkopuuta m ³	Kuorta ja metsä- tähdettä	Kaikki yhteensä
Kuusi	78 667	11 616	90 283	40 980	131 263
Mänty	21 583	5 808	27 391	11 018	38 409
Koivu	7 152	4 184	11 336	5 127	16 463
Yhteensä	107 402	21 608	129 010	57 125	186 135
	Kuorta		+20 990	-20 990	

Taulukko 4. Terminaalilla käsittelemät puumäärät yksivuorotyössä.

Puulaji	Tukkia	Kuitua	Yhteensä runkopuuta m ³	Kuorta ja metsä- tähdettä	Kaikki yhteensä
Kuusi	39 725	5 417	45 142	20 492	65 634
Mänty	9 286	4 410	13 696	5 509	19 205
Koivu	3 785	1 883	5 668	2 564	8 232
Yhteensä	52 796	11 710	64 506	28 565	93 071
	Kuorta		+10 494	-10 471	

GJ, arvoltaan 1,75 milj. mk kivihiilen referenssihinnan mukaan laskettuna.

Nettosäästön aleneminen enemmän kuin puolella johtuu korjattavan puuston rakenteen muutoksesta huonompaan suuntaan.

5.3 Herkkyysanalyysit

Asetelmassa (s. 105) esitettiin kaksivuorotyön osalta, kuinka paljon puun korjuu-, kuljetus- ja tehdaskäsittelykustannukset kohoavat, jos terminaalilla ei perusteta, vaan työt tehdään edullisimmalla tavalla perinteisiä tavaralajimenetelmiä käyttäen.

Kaikkien korjuumenetelmien kustannukset ovat varsin herkkiä rungonkoon aiheuttamalle vaihtelulle. Tästä syystä tutkittiin 2-vuorotyössä edullisimman tavoitefunktiovaihtoehdon tasolla sitä, tulisiko terminaalilla perustetuksi ja mitä korjuumenetelmiä tulisi käyttää, jos kolme suurinta puunkokoluokkaa

rajattaisiin pois. Edelleen selvitettiin, mitkä olisivat kustannusvaikutukset.

Taulukossa 5 on esitetty terminaalille tuloon tulevat puumäärät ja metsätähdet. Tukin osuus terminaalille toimitettavasta kokonaispuumäärästä alenee lähes puoleen, mikä on luonnollista puunkoon pienentyessä selvästi. Metsätähteen kokonaisuudessa ei tapahdu merkittävää muuttumista, mikä taas johtuu alkuolettamuksesta, että metsätähteen suhteellinen määrä tukkikokoa olevilla puilla kasvaa vain lievästi rungon koon pienentyessä.

Taulukko 5. Terminaalille tuleva puumäärä, kun kolme suurinta rungonkokoluokkaa on rajattu pois.

Puulaji	Tukkia	Kuitua	Yhteensä runkopuuta m ³	Kuorta ja metsä- tähdettä	Kaikki yhteensä
Kuusi	41 842	47 880	92 722	41 903	134 625
Mänty	19 493	8 227	27 720	10 706	38 430
Koivu	5 098	6 782	11 880	4 582	16 462
Yhteensä	66 433	62 887	129 320	57 191	186 511
	Kuorta		+20 680	-20 680	
Yhteensä			150 000	36 511	

Taulukko 6. Puulajeittainen korjuuketjujen edullisin jakautuminen etäisyyden ja kokoluokan mukaan, kun kokoluokat (4-6) rajattu pois (terminaali käy 2 vuorossa).

Puulaji	Etäisyysluokka	Puun kokoluokka					
		1	2	3	4	5	6
		Edullisin menetelmä					
Kuusi	1	pmen 1	pmen 1	pmen 3	-	-	-
	2	pros.	pros.	pmen 3	-	-	-
	3	pros.	pros.	pros.	-	-	-
Mänty	1	tosa 1	tosa 1	pmen 3	-	-	-
	2	ihm.	pmen 1	pmen 3	-	-	-
	3	ihm.	pros.	pros.	-	-	-
Koivu	1	tosa 1	tosa 1	pmen 3	-	-	-
	2	pmen 1	ihm.	pmen 3	-	-	-
	3	ihm.	ihm.	ihm.	-	-	-

ihm. = ihmistyövaltainen tavaralajimenetelmä (korjuuketju 1)

pros. = prosessorin perustuva tavaralajimenetelmä (korjuuketju 2)

pmen 1 = erilliskaatoon ihmistyönä ja pihntuontoon perustuva korjuumenetelmä (korjuuketju 6)

pmen 3 = kaato-kasauskoneeseen ja pihntuontotraktoriin perustuva korjuumenetelmä (korjuuketju 8)

tosa 1 = ihmistyövaltainen tukkiosamenetelmä (korjuuketju 9)

Taulukossa 6 on esitetty käyttöön tulevat korjuumenetelmät. Terminaali tulee tässäkin tapauksessa perustetuksi ja sille hankittavaa puuta korjattaessa voitaisiin käyttää myös puolikoneellista kokopuumenetelmää (korjuuketju 6). Runkomenetelmät eivät olisi edullisia käyttää myöskään tässä tapauksessa.

Tavoitefunktion herkkyyksianalyysin avulla tutkittiin myös kustannustekijöiden mahdollisten muutosten vaikutuksia saatuaan optimaaliseen ratkaisuun. Korjuukustannusten sallitut vaihtelurajat on esitetty 2-vuorotyössä käytettävän terminaalilla osalta taulukossa 7.

Kokopuumenetelmien kustannusten vaihteluvälit ovat varsin ahtaat, vain 1-2 mk:n/m³ suuruiset suurissa puunkokoluokissa. Tavaralajimenetelmien kustannukset sen sijaan saavat vaihdella erittäin runsaasti pienissä kokoluokissa optimaalisen ratkaisun pysyessä muuttumattomana.

Taulukosta 8 havaitaan, että mikäli haluttaisiin saada lisäraaka-ainetta puumäärärajoitinta höllentämällä, se kuusen osalta olisi edullisinta ottaa suurimmasta puunkokoluokasta kuljetusetäisyydellä 3 varjohintaan 0,40 mk/m³ ja toiseksi edullisinta kokoluokasta 4 kuljetusetäisyydeltä 2 varjohintaan 7,80 mk/m³. Edullisessa käytettiin kokopuumenetel-

Taulukko 7. Korjuu- ja kuljetuskustannusten vaihtelurajat edullisimmassa tavoitefunktiovaihtoehdossa I.

Menetelmä	Puun- koko- luokka	Kuusi		Mänty		Koivu	
		alaraja	yläraja	alaraja	yläraja	alaraja	yläraja
	1	–	27,55	– 3,55	1,20	– 3,70	1,80
	2	–	25,10	– 2,95	1,80	– 0,05	8,50
Tavaralaji-	3	–	11,50	– 3,75	0,95	– 3,55	1,00
menetelmät	4	– 16,90	0,70	– 0,95	0,60	– 0,95	0,05
	5	– 4,90	0,00	– 0,60	0,00	– 0,55	0,95
	6	– 5,85	0,00	–	–	– 1,55	3,45
	1	–	–	– 1,25	3,53	– 1,75	3,65
	2	–	–	– 1,80	2,95	– 8,50	0,05
Kokopuu-	3	–	–	– 0,95	4,75	– 1,00	3,55
menetelmät	4	– 2,95	0,10	– 0,60	0,95	– 0,05	0,95
	5	– 0,10	0,50	– 8,30	0,50	– 0,95	0,55
	6	– 0,50	0,40	– 0,50	1,50	– 3,45	1,55

Taulukko 8. Puumäärän sulteen lasketut optimaalisen ratkaisun rajat kaksivuorotyössä sekä niiden varjohinnat. Tavoitefunktiovaihtoehto I.

Puulaji	Puun koko- luokka	Etäisyys 1			Etäisyys 2			Etäisyys 3		
		1 000 m ³ ala	ylä	Varjohinta, mk/m ³	1 000 m ³ ala	ylä	Varjohinta, mk/m ³	1 000 m ³ ala	ylä	Varjohinta, mk/m ³
	1	0,0	61,9	40,25	0,0	72,6	35,50	0,0	81,7	27,55
	2	0,0	94,9	37,70	0,0	161,6	33,00	6,3	218,9	25,10
Kuusi	3	0,0	73,1	24,00	19,9	133,8	19,35	72,1	186,0	11,50
	4	8,1	45,0	12,55	7,9	85,3	7,80	*	*	*
	5	3,3	40,2	19,60	20,9	57,8	11,90	*	*	*
	6	1,3	38,2	20,00	10,9	47,8	12,30	18,6	55,5	0,40
	1	0,0	7,2	36,85	0,0	74,5	25,60	0,0	77,2	17,60
	2	0,0	11,3	27,30	0,3	60,7	16,60	17,5	77,9	8,50
Mänty	3	0,0	10,9	17,85	7,0	45,4	8,20	*	*	*
	4	0,0	9,1	12,95	6,4	32,8	4,60	*	*	*
	5	0,0	7,6	13,00	0,0	12,9	4,65	*	*	*
	6	0,0	7,0	13,40	0,0	9,9	5,05	*	*	*
	1	0,0	3,1	48,30	0,0	57,9	35,95	0,0	59,1	26,55
	2	0,0	4,9	48,25	0,0	66,9	42,60	0,0	74,3	33,20
Koivu	3	0,0	4,6	44,15	0,0	65,9	31,90	0,0	72,6	22,50
	4	0,0	3,9	40,25	2,7	62,1	29,20	0,0	66,1	19,75
	5	0,0	3,3	38,55	0,0	5,5	28,40	0,0	60,9	18,40
	6	0,0	3,0	39,15	0,0	4,2	29,30	0,0	58,7	18,35

* ao. olosuhteista kaikkea puumäärää ei ole käytetty, joten varjohintoja ei ole laskettu

mää ja jälkimmäisessä tavaralajikorjuuta harvesterilla. Vastaavalla tavalla voidaan myös muut olosuhteet asettaa arvojärjestykseen lisäpuun saamisen suhteen.

Raja-arvoanalyysi osoittaa edelleen, että kahdessa vuorossa käytettävän terminaalin kokoa olisi kannattavaa kasvattaa aina 180 000 m³:iin saakka varjohintaan –21,40 mk. Toisin sanoen jokaista korjattavaa lisäkuutiometriä kohti kokonaiskustannukset alenisivat 21,40 mk eli yhteensä 642 000 mk. Tämä summa pitää sisällään sekä korjuukustannushyödyn että energiahyödyn.

Taulukko 9. Korjuuketjun 10* lisäkustannukset kuusen osalta edullisimpaan vaihtoehtoon verrattuna.

Kuljetus- etäisyys- luokka	Rungonkokuoluokka					
	1	2	3	4	5	6
	Lisäkustannukset, mk/m ³					
1	42,90	32,70	23,75	23,00	22,20	22,60
2	47,80	37,65	29,00	27,90	24,15	24,55
3	50,75	40,65	32,05	31,10	23,15	23,55

* kaato-juonto- + karsintakone varastolla, tukkiosien ja kuitupuun auto-
kuljetus, metsätähteitten varastohaketus ja hakkeen erillinen autokuljetus

6 PÄATELMÄT JA SUOSITUKSET

Tässä tutkimuksessa sovelletun menetelmän käyttöön ja erityisesti tulosten tulkinnaan liittyy eräitä huomionarvoisia näkökohtia.

1. Tutkimusmenetelmä, so. lineaarinen optimointi, ja sen johdannaisanalyysit antavat aina numeerisesti oikean tuloksen, mikäli ohjelmointivirhettä ei ole tehty, mikä kaupallisia ohjelmapaketteja käytettäessä on hyvin epätodennäköistä.
2. Tutkimuksen tuloksiin liittyvät suurimmat epävarmuustekijät ovatkin
 - ongelman kuvauksen luotettavuus ja
 - lähtötietojen luotettavuus
 - työntutkimustietojen osalta
 - kustannustietojen osalta
 - teknisten riippuvuuksien osalta
 - inhimillisten tekijöiden osalta

Analyysimenetelmän voidaan katsoa toimineen tässä tapauksessa varsin hyvin eikä ongelman muotoilu sinänsä tuottanut vaikeuksia. Koska kaikkien menetelmien tuotos- ja kustannuslukuja ei ole saatu käyttökokeusten ja toteutuneiden kustannusten nojalla, tulosten tulkinnassa on tämä laskennallinen epävarmuus otettava huomioon.

Mikäli tämän analyysin antamien tulosten pohjalta ryhdytään tekemään jatkoselvityksiä, niiden tulisi nähdäkseni kohdistua seuraaville alueille, joista lisätiedon tarve on ilmeisin.

1. Amerikkalaistyypin joko tela- tai pyörälustaisen kaato-kasauskoneen käyttömahdollisuuksien selvitys
2. Pihtijuontotruktorin käyttö kokopuiden ja -runkojen laahusuunnossa
3. Kokorunkojen ja -puiden kuormaus metsävarastolla etukuormaajalla
4. Tavallisen pylväsaaton kehittämismahdollisuuksien tutkiminen kokopuiden ja -runkojen kuljetusvälineeksi
5. Kokopuuautojen hyötykuorman kasvattaminen ja kuorman suojaaminen tieliikennelain vaatimusten mukaiseksi
6. Tukkiosamenetelmien edelleenkehittäminen ja niihin soveltuvan tekniikan tutkiminen
7. Energiahakkeeksi tehtävän metsätähteen tienvarsihaketus tai -murskaus
8. Terminaalien puunkäsittelytekniikan automatisointi ja kehittäminen

ODC 308--015.5+311+63+661

ISBN 951-651-058-2

MIKKONEN, E. 1983. Eräiden matemaattisen ohjelmoinnin menetelmien käyttö puun korjuun ja kuljetuksen sekä tehdaskäsittelyn menetelmävälinnan apuvälineenä. Summary: The usefulness of some techniques of the mathematical programming as a tool for the choice of timber harvesting system. Acta For. Fenn. 183: 1-110.

The goal programming approach with postoptimality analysis seems to be the best routine for the mathematical handling of problems related to wood procurement i.e. logging, forest haulage, long distance transportation and wood handling at a millyard. The approach does not allow to determine the hierarchy of the goals objectively as they depend on the subjective preferences of the decision makers. If a single objective function can be formulated unambiguously in economic terms the best method is standard linear programming. This is not the case, however, when one has to attain or satisfy several goals in wood procurement simultaneously. Other applicable but less suitable methods are parametric programming, mixed integer and integer programming.

Author's address: Metsäteho, The Forest Work Study Section of the Central Association of Finnish Forest Industries, Fabianinkatu 9 B, SF-00130 Helsinki 13, Finland

ODC 308--015.5+311+63+661

ISBN 951-651-058-2

MIKKONEN, E. 1983. Eräiden matemaattisen ohjelmoinnin menetelmien käyttö puunkorjuun ja kuljetuksen sekä tehdaskäsittelyn menetelmävälinnan apuvälineenä. Summary: The usefulness of some techniques of the mathematical programming as a tool for the choice of timber harvesting system. Acta For. Fenn. 183: 1-110.

The goal programming approach with postoptimality analysis seems to be the best routine for the mathematical handling of problems related to wood procurement i.e. logging, forest haulage, long distance transportation and wood handling at a millyard. The approach does not allow to determine the hierarchy of the goals objectively as they depend on the subjective preferences of the decision makers. If a single objective function can be formulated unambiguously in economic terms the best method is standard linear programming. This is not the case, however, when one has to attain or satisfy several goals in wood procurement simultaneously. Other applicable but less suitable methods are parametric programming, mixed integer and integer programming.

Author's address: Metsäteho, The Forest Work Study Section of the Central Association of Finnish Forest Industries, Fabianinkatu 9 B, SF-00130 Helsinki 13, Finland

ODC 308--015.5+311+63+661

ISBN 951-651-058-2

MIKKONEN, E. 1983. Eräiden matemaattisen ohjelmoinnin menetelmien käyttö puunkorjuun ja kuljetuksen sekä tehdaskäsittelyn menetelmävälinnan apuvälineenä. Summary: The usefulness of some techniques of the mathematical programming as a tool for the choice of timber harvesting system. Acta For. Fenn. 183: 1-110.

The goal programming approach with postoptimality analysis seems to be the best routine for the mathematical handling of problems related to wood procurement i.e. logging, forest haulage, long distance transportation and wood handling at a millyard. The approach does not allow to determine the hierarchy of the goals objectively as they depend on the subjective preferences of the decision makers. If a single objective function can be formulated unambiguously in economic terms the best method is standard linear programming. This is not the case, however, when one has to attain or satisfy several goals in wood procurement simultaneously. Other applicable but less suitable methods are parametric programming, mixed integer and integer programming.

Author's address: Metsäteho, The Forest Work Study Section of the Central Association of Finnish Forest Industries, Fabianinkatu 9 B, SF-00130 Helsinki 13, Finland

ODC 308--015.5+311+63+661

ISBN 951-651-058-2

MIKKONEN, E. 1983. Eräiden matemaattisen ohjelmoinnin menetelmien käyttö puunkorjuun ja kuljetuksen sekä tehdaskäsittelyn menetelmävälinnan apuvälineenä. Summary: The usefulness of some techniques of the mathematical programming as a tool for the choice of timber harvesting system. Acta For. Fenn. 183: 1-110.

The goal programming approach with postoptimality analysis seems to be the best routine for the mathematical handling of problems related to wood procurement i.e. logging, forest haulage, long distance transportation and wood handling at a millyard. The approach does not allow to determine the hierarchy of the goals objectively as they depend on the subjective preferences of the decision makers. If a single objective function can be formulated unambiguously in economic terms the best method is standard linear programming. This is not the case, however, when one has to attain or satisfy several goals in wood procurement simultaneously. Other applicable but less suitable methods are parametric programming, mixed integer and integer programming.

Author's address: Metsäteho, The Forest Work Study Section of the Central Association of Finnish Forest Industries, Fabianinkatu 9 B, SF-00130 Helsinki 13, Finland

ACTA FORESTALIA FENNICA

- 168 Wuolijoki, E. 1981. Effects of simulated tractor vibration on the psychophysiological and mechanical functions of the driver: Comparison of some excitatory frequencies. Seloste: Traktorin simuloitun tärinän vaikutukset kuljettajan psykofysiologisiin ja mekaanisiin toimintoihin: Eräiden herätetaajuuksien vertailu.
- 169 Chung, M.-S. 1981. Flowering characteristics of *Pinus sylvestris* L. with special emphasis on the reproductive adaptation to local temperature factor. Seloste: Männyn (*Pinus sylvestris* L.) kukkimisominaisuuksista, erityisesti kukkimisen sopeutumisesta paikalliseen lämpöilmastoon.
- 170 Savolainen, R. & Kellomäki, S. 1981. Metsän maisemallinen arvostus. Summary: Scenic value of forest landscape.
- 171 Thammincha, S. 1981. Climatic variation in radial growth of Scots pine and Norway spruce and its importance to growth estimation. Seloste: Männyn ja kuusen sädekasvun ilmastollinen vaihtelu ja sen merkitys kasvun arvioinnissa.
- 172 Westman, C. J. 1981. Fertility of surface peat in relation to the site type class and potential stand growth. Seloste: Pintaturpeen viljavuuden tunnuksat suhteessa kasvupaikkatyyppiin ja puuston kasvupotentiaaliin.
- 173 Chung, M.-S. 1981. Biochemical methods for determining population structure in *Pinus sylvestris* L. Seloste: Männyn (*Pinus sylvestris* L.) populaatiarakenteesta biokemiallisten tutkimusten valossa.
- 174 Kilkki, P. & Varmola, M. 1981. Taper curve models for Scots pine and their applications. Seloste: Männyn runkokäyrämalleja ja niiden sovellutuksia.
- 175 Leikola, M. 1981. Suomen metsätieteellisen julkaisutoiminnan rakenne ja määrällinen kehitys vv. 1909–1978. Summary: Structure and development of publishing activity in Finnish forest sciences in 1909–1978.
- 176 Saarilahti, M. 1982. Tutkimuksia radioaalto menetelmien soveltuvuudesta turvemaiden kulkelpoisuuden arvioimiseen. Summary: Studies on the possibilities of using radar techniques in detecting the trafficability of peatlands.
- 177 Hari, P., Kellomäki, S., Mäkelä, A., Ilonen, P., Kanninen, M., Korpilahti, E. & Nygrén, M. 1982. Metsikön varhaiskehityksen dynamiikkaa. Summary: Dynamics of early development of tree stand.
- 178 Turakka, A., Luukkanen, O. & Bhumibhamon, S. 1982. Notes on *Pinus kesija* and *P. merkusii* and their natural regeneration in watershed areas of northern Thailand. Seloste: Havaintoja männystä (*Pinus kesija* ja *P. merkusii*) ja mäntyjen luontaisesta uudistumisesta Pohjois-Thaimaan vedenjakaja-alueilla.
- 179 Nyssönen, A. & Ojansuu, R. 1982. Metsikön puutavaralajirakenteen, arvon ja arvokasvun arviointi. Summary: Assessment of timber assortments, value and value increment of tree stands.
- 180 Simula, M. 1983. Productivity differentials in the Finnish forest industries. Seloste: Tuottavuuden vaihtelu Suomen metsäteollisuudessa.
- 181 Pohtila, E. & Pohjola, T. 1983. Lehvästöröiskutuksen ajoitus kasvukauden aikana. Summary: The timing of foliage spraying during the growing season.
- 182 Kilkki, P. 1983. Sample trees in timber volume estimation. Seloste: Koeputat puuston tilavuuden estimoinnissa.

KANNATTAJAJÄSENET – SUPPORTING MEMBERS

CENTRALSKOGSNÄMNDEN SKOGSKULTUR	VEITSILUOTO OSAKEYHTIÖ
SUOMEN METSÄTEOLLISUUDEN KESKUSLIITTO	OSUUSPANKKIEN KESKUSPANKKI OY
OSUUSKUNTA METSÄLIITTO	SUOMEN SAHANOMISTAJAYHDISTYS
KESKUSOSUUSLIIKE HANKKIJA	OY HACKMAN AB
SUNILA OSAKEYHTIÖ	YHTYNEET PAPERITEHTAAT OSAKEYHTIÖ
OY WILH. SCHAUMAN AB	RAUMA REPOLA OY
OY KAUHAS AB	OY NOKIA AB, PUUNJALOSTUS
KEMIRA OY	JAAKKO PÖYRY CONSULTING OY
G. A. SERLACHIUS OY	KANSALLIS-OSAKE-PANKKI
KYMI KYMMENE	SOTKA OY
KESKUSMETSÄLAUTAKUNTA TAPIO	THOMESTO OY
KOIVUKESKUS	SAASTAMOINEN YHTYMÄ OY
A. AHLSTRÖM OSAKEYHTIÖ	OY KESKUSLABORATORIO
TEOLLISUUDEN PUUYHDISTYS	METSÄNJALOSTUSSÄÄTIÖ
OY TAMPELLA AB	SUOMEN METSÄNHOITAJALIITTO
JOUTSENO-PULP OSAKEYHTIÖ	SUOMEN 4H-LIITTO
KAJAANI OY	SUOMEN PUULEVYTEOLLISUUSLIITTO R.Y.
KEMI OY	OULU OY
MAATALOUSTUOTTAJAIN KESKUSLIITTO	OY W. ROSENLEW AB
VAKUUTUSOSAKEYHTIÖ POHJOLA	METSÄMIESTEN SÄÄTIÖ

ISBN 951-651-058-2

Arvi A. Karisto Oy:n kirjapaino
Hämeenlinna 1983