



Janne Väättäinen



Teijo Palander



Pertti Harstela

Janne Väättäinen, Teijo Palander ja Pertti Harstela

Puunhankinnan meno-paluu- kuljetusten optimointimalli

Väättäinen, J., Palander, T. & Harstela, P. 2002. Puunhankinnan meno-paluukuljetusten optimointimalli. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2002: 5–17.

Tässä tutkimuksessa on selvitetty meno-paluukuljetuksien avulla puutavaran maantiekuljetusten kannattavuuden parantamista suomalaisen puunhankinnan ja ensisijaisesti sen taktisen suunnittelun näkökulmasta. Tutkimuksessa kehitettiin dynaamiseen puuvirtamalliin perustuva meno-paluukuljetukset huomioiva optimointimalli. Mallissa tiimien ja niitä ylemmän organisaatiotason kuljetustavoite formuloitiin myös meno-paluukuljetusvaihtoehdon avulla. Optimoinnin tulos oli kuljetussuunnitelma sekä meno-paluukuljetukset huomioivalla puuvirtamallilla, että vastaavalla puuvirtamallilla, joka huomioi pelkät menokuljetukset. Tulosten analyysi osoitti, että riittävästi yleistettyinäkin meno-paluukuljetukset olivat kannattavia, koska kuljetussuunnitelmat olivat erilaisia ja samalla puunhankinnan kokonaiskustannukset alenivat. Jatkoanalyysissä taktiseen lähestymistapaan liitettiin myös operatiivisia piirteitä, jotta meno-paluukuljetusten leimikko- ja autokuormakohtaiset kustannusvaikutukset selvisivät. Tätä varten kuljetussuunnitelmille valittiin pystyvarannosta leimikot ja niiden puumääristä muodostettiin kuormat, joille laskettiin toteutuneet yksikkökustannukset. Tulosten perusteella meno-paluukuljetuksilla saavutettavat säästöt puutavarakuljetusten yksikkökustannuksissa voisivat varovaisen arvion mukaan olla 2–3 % ja optimistisen arvion mukaan 3,5–4,5 %. Yksittäisissä tapauksissa päästiin jopa 7 %:n positiivisiin kustannusvaikutuksiin.

Asiasanat: kannattavuustarkastelu, kustannuslaskenta, operatiivinen suunnittelu, taktinen suunnittelu

Yhteystiedot: *Väättäinen* ja *Palander*, Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101

Joensuu; *Harstela*, Metla, Suonenjoen tutkimusasema, 77600 Suonenjoki

Sähköposti teijo.palander@forest.joensuu.fi

Hyväksytty 22.11.2001

I Johdanto

Suurin osa puutavaran maantiekuljetuksista on kannattavinta kuljettaa nykyisen käytännön mukaisesti pelkkinä menokuljetuksina. Pitkillä puutavaran kuljetusmatkoilla korkeita kustannuksia voidaan alen-
taa valitsemalla kuljetusmuodoksi joko rautatiekuljetus tai uitto. Osa puutavaralajeista joudutaan kuitenkin kuljettamaan autokuljetuksina myös kaukana lähtöalueista sijaitseville tehtaille, jolloin pitkä tyhjänä ajettu paluumatka nostaa kuljetuksen kustannuksia. Siksi tyhjänä ajetun matkan minimoimiseen on kehitetty useita operatiivisia maantiekuljetusten optimointimalleja. Usein nämä mallit perustuvat joko verkkoteorian tai heuristiikan hyväksikäyttöön muistuttaen toisiaan riippumatta siitä mitä kuljetetaan. Myös taktiset optimointimallit voivat perustua verkkoteoriaan tai heuristiikkaan. Tällainen on esimerkiksi Beaujonin ja Turnqvistin (1991) esittämä malli, jolla kuljetuskaluston käyttö voidaan optimoida autokuormittain.

Meno-paluukuljetuksia on joissain yhteyksissä esitetty eräänä mahdollisuutena kustannusten alen-
tamiseen. Meno-paluukuljetuksessa puutavara-auto kuljettaa kuorman myös menoreitiltä palatessaan, koska puuta kuljetetaan usein vastakkaisiin suuntiin. Vaikka ajatus tuntuu houkuttelevalta, kaikkia kuljetuksia on tuskin mahdollista järjestää meno-paluukuljetuksina. Niiden määrää voi muun muassa rajoittaa sopivien paluukuljetusalueiden vähyys ja tehtaiden sijainti, koska paluukuljetuksia ei kannata kuljettaa muualta kuin paluureittien ja tehtaiden läheisyydestä. Toisaalta puutavara-autoilla on tuskin mahdollista kuljettaa enempää kuin yksi paluukuljetus yhtä menokuljetusta kohti, koska kuljetusten suunnittelu saattaisi vaikeutua merkittävästi.

Kirjallisuudesta on ollut löydettävissä jo kauan tutkimuksia, joissa meno-paluukuljetusmahdollisuuksien selvittämistä on käytetty osana operatiivisessa suunnittelussa. Dejax ja Crainic (1987) kokosivat ja luokittelivat tärkeimmät tätä lähestymistapaa käsittelevät tutkimukset. Tulosten perusteella VRP (vehicle routing problem) ja VRPB (vehicle routing problem with backhauls) ovat olleet yleisimmät tavat luokitella tämän lähestymistavan suunnittelutehtäviä. VRP oli muun muassa Jordanin ja Burnsin (1984) käytössä, kun he analysoivat meno-paluukuljetusmahdollisuuksia kahden terminaalin kulje-

tusverkostossa. He kehittivät kaksi mallia, joilla he selvittivät kustannusvaikutuksia. Tuloksista selvisi mitkä kuormat kannatti kuljettaa meno-paluukuljetuksena tyhjänä ajetun matkan minimoimiseksi. Sittemmin Toth ja Vigo (1998) sekä Potvin ym. (1996) ovat esittäneet heuristisiin sääntöihin perustuvat algoritmit, joilla VRPB voidaan myös ratkaista. Toisaalta Gelinan ym. (1995) ovat käyttäneet resurssien jakamiseen perustuvaa menetelmää lähes samanlaisen kuljetusongelman (VRPTW, vehicle routing problem with time windows) ratkaisemiseen.

Edellisessä kappaleessa mainittujen mallien, algoritmien ja menetelmien heikkoutena on, ettei niitä ole kehitetty puutavarakuljetusten suunnitteluvälineiksi. Lisäksi niiden tulosten järjestyksen soveltaminen on mahdotonta puunhankinnan suunnittelulle ominaisessa taktisessa suunnittelussa. Itse asiassa taktisen menopaluu-
kuljetusongelman mallintaminen on reititysmalleilla vaikea tehtävä. Ilmeisesti siksi meno-paluukuljetukset on huomioitu vain autojen reitityksessä ja metsäyhtiöiden operatiivisten mallien ja järjestelmien avulla. Edellä mainittujen syiden vuoksi koko aihepiiriä on vähän käsitelty taktisen suunnittelun lähtökohdista.

Toistaiseksi on selvittämättä toisiko meno-paluukuljetuksien huomioiminen taktisessa suunnittelussa mahdollisia lisä säästöjä. Puunhankinnan taktisella suunnittelulla tarkoitetaan suunnittelua, joka tehdään tehtaiden puuntarpeen mukaisesti viikkojen tai korkeintaan kuukausien aikajänteellä jakamatta vielä leimikoita tai kuljetuskuormia. Tällä suunnittelulla tavoitellaan muun muassa kannattavaa toimintaa yli organisaation aluerajojen. Toistaiseksi Carlsson ja Rönnqvist (1998) ovat esittäneet ainoan puutavarakuljetuksia optimoivan taktisen suunnittelumallin, joka sisältää myös meno-paluukuljetukset. Vaikka mallin käytäntöön soveltamisessa on ilmennyt vaikeuksia, on mallin testauksissa osoitettu meno-paluukuljetuksien kannattavuus ruotsalaisessa puunhankintaympäristössä.

Suomessa kunkin kolmen suuren metsäteollisuusyrityksen puunhankinnasta vastaa oma metsäosasto, joka jaetaan alueellisesti ja toiminnallisesti erillisiin yksiköihin: hankinta-alueisiin, piireihin ja tiimeihin. Tällaisessa puunhankintaorganisaatiossa puunhankintaa koskevat suunnitelmat laaditaan operatiivisista kuljetuksista vastuussa olevia tiimejä ylemmällä organisaatiotasolla, mutta niitä täsmennetään ti-

mien kanssa käytävissä neuvotteluissa. Suunnittelun yhteydessä käytävien neuvottelujen pohjana käytetään muun muassa ennakkotietoja tiimien alueilta tehtaille optimoiduista puuvirroista. Toistaiseksi nämä tiedot eivät ole sisältäneet suunnittelutietoja meno-paluukuljetuksina kuljetettavista puumääristä, koska meno-paluukuljetusten kannattavuus- ja kustannusvaikutukset ovat vielä selvittämättä. Jos positiiviset vaikutukset olisivat riittävän merkittäviä, niin optimointimallin ja menetelmän kehittäminen voisi osoittautua tarpeelliseksi myös käytännön puunhankintaa varten.

Tämän tutkimuksen ensisijaisena tavoitteena oli kehittää Palanderin (1995a,b) käyttämästä dynaamisesta puuvirtamallista meno-paluukuljetukset huomioiva malli, jotta meno-paluukuljetusten kannattavuus selviäisi hankinta-alueita kuvaavassa kokeellisessa puunhankintaympäristössä. Samalla myös ratkaistiin millaisia vaikutuksia meno-paluukuljetuksilla oli kuljetuksien määrään tiimien alueilta läheisille tehtaille. Lisäksi tutkimuksessa selvitettiin, miten meno-paluukuljetukset vaikuttavat kuljetusten yksikkökustannuksiin. Tätä varten taktiseen lähestymistapaan liitettiin joitakin operatiivisia piirteitä. Tämän kokeellisen puunhankintaympäristön muodostamiseen käytettiin myös Oinaan ja Sikaasen (2000) kehittämiä leimikkogeneraattorin malleja. Edellä mainitun kaltaisia malleja ja menetelmiä ei ole aikaisemmin yhdessä käytetty selvittäessä meno-paluukuljetusten merkitystä käytännön puunhankinnalle. Johtopäätökset tehtiin vertailemalla meno-paluukuljetuksia ja pelkkiä menokuljetuksia toisiinsa ja samalla silmälläpitäen malliorganisaation molempien suunnittelutasojen tarpeita.

2 Mallit ja menetelmät

2.1 Meno-paluukuljetusmallin sovellutus

Eräs tärkeimmistä optimointimenetelmillä ratkaistavista puunhankinnan ongelmista on kuljetusongelma. Puunhankinnan näkökulmasta kuljetusongelmassa on kyse tiimien tienvarsivarastoissa olevista puutavaralajeista, jotka tulee kuljettaa niitä käyttäville tehtaille mahdollisimman pienin kustannuksin. Ongelman mallittamisen lähtökohtana ovat tiedot

tehtaiden puuntarpeesta ja tiimien puuntoimituskyvystä kunkin suunnittelujakson aikana. Taktisesta näkökulmasta kuljetusongelma tulee myös formuloida osana suurempaa puunhankintamallia. Lisäksi se kannattaa formuloida lineaarisella tai lineaarisesti palautuvalla optimointimallilla, koska ratkaistavat ongelmat ovat suuria ja mallin ratkaisemisessa on parasta tukeutua todennettuun teoriaan (Palander 1998). Yhteistä kaikille lineaarisille malleille on i) päätös/tavoitemuuttujista koostuva minimoitava tavoitefunktio, ii) mallin muotoon formuloitavasta systeemistä johtuvat reunaehtojen mukaiset tavoitteet, jotka määritetään malleissa rajoitteiksi, ja iii) ehto, jonka mukaan päätösmuuttujat voivat saada vain positiivisia kvantitatiivisia arvoja. Lisäksi, kuten tässä sovellutuksessa, mallien päätösmuuttujien kertoimet (kustannukset) voivat ilmaista resurssien kulutuksen tason, jonka kukin systeemin muuttuva toiminto aiheuttaa.

Seuraavassa esitetään lineaarisen mallin avulla, miten tässä sovellutuksessa meno-paluukuljetukset huomioitiin kaksivaiheisesti. Ensinnäkin meno-paluukuljetuksina kuljetettavat puumäärät olivat mukana puuvirtamallin tavoitteina, joita asetettiin sekä tiimeille että niitä ylemmälle organisaatiotasolle. Tavoitteiden määrittelyä varten tavoitefunktioon valittiin päätösmuuttujiksi sekä meno- että paluukuljetustavoitteet (1). Ne määritettiin puuvirtana tiimitä tehtaalte. Nämä päätösmuuttujat formuloitiin tavoitefunktioon erillisiksi, mutta niistä muodostettiin yksi yhteinen meno-paluukuljetustavoite yhdistämällä ne toisiinsa rajoitteiden (2) avulla. Toiseksi, jokaiselle tiimikohtaiselle menokuljetustavoitteelle formuloitiin yksi paluukuljetustavoite, jolloin oli ainoastaan selvitettävä, mistä ja minne kukin paluukuljetus oli kannattavinta kuljettaa. Kaikista paluukuljetusvaihtoehdoista päätettiin valita matriisiteknikkaa käyttäen se, jossa paluukuljetusmatka oli lyhin. Taulukossa 1 määritetään tiimin j menokuljetuksille paluukuljetukset, jotka on haettava tiimin j alueelta ja kuljetetaan tehtaalte k . Tutkimuksen selkeyden vuoksi mallissa kuljetettiin vain mäntytkä ja mäntykuitupuuta.

Tavoitefunktio:

$$\min Z = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K cy_{jk} Y_{jk} + \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K cy_{rjk} YR_{jk} \quad (1)$$

Rajoitteet:

$$\sum_{j=1}^J Y_{jk} + \sum_{j=1}^J YR_{jk} = D_k \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^K Y_{jk} + \sum_{k=1}^K YR_{jk} = YT \max_j$$

Ei-negatiivisuus:

$$Y_{jk}, YR_{jk} \geq 0 \quad (3)$$

Mallissa:

Z = minimoitava yhteinen kokonaistavoite
(mk/m^3)

Y_{jk} = tiimin j alueelta menokuljetuksena tehtaalle k kuljetettava puumäärä (m^3)

YR_{jk} = tiimin j alueelta paluukuljetuksena tehtaalle k kuljetettava puumäärä (m^3)

cy_{jk} = menokuljetuskustannus tiimin j alueelta tehtaalle k (mk/m^3)

cyr_{jk} = paluukuljetuskustannus tiimin j alueelta tehtaalle k (mk/m^3)

D_k = puun tarve tehtaalla k (m^3)

$YT \max_j$ = puumäärä, joka voidaan kuljettaa paluukuljetuksena tiimin j alueelta (m^3)

J = tiimien alueiden lukumäärä (1, ..., j , ..., 6)

K = tehtaiden lukumäärä (1, ..., k , ..., 4)

Yleinen puunhankintaketjun puuvirtamalli ja sen ratkaisumenetelmä

Tutkimuksin on todennettu, että dynaamisuus voi ilmetä malleissa joko vaihtoehtojen peräkkäisyytenä tai, kuten "aidoissa" dynaamisen ohjelmoinnin sovellutuksissa, ajan suhteen toisistaan riippuvina päätösvaihtoehtoina (Dijkstra 1992). Myös Bailey (1973) ja Lohmander (1989, 1991, 1992) ovat käyttäneet dynaamisia malleja omissa tutkimuksissaan. Hadley (1964) mukaan päätöksentekotilanne, jossa päätösvaihtoehdot riippuvat ajasta voidaan ratkaista teoreettisesti oikein vain dynaamisen ohjelmoinnin (Dynamic Programming) proseduureilla. Jos pyritäisiin vain absoluuttiseen tarkkuuteen, niin tätä periaatetta tulisi soveltaa myös puunhankinnassa, koska puunhankinnan suunnittelun eräs apuväline puuvirtamalli on kuvaus puunhankintaketjusta, jonka mallittamisessa on huomioitava sekä toimintojen pe-

Taulukko 1. Toteuttamiskelpoiset meno-paluukuljetusyhdistelmät. Taulukossa on esitetty tiimin j alueelta tehtaalle k kuljetettaville menokuljetuksille tiimi j , jonka alueelta paluukuljetukset tuli kuljettaa tehtaalle k . Taulukossa j : 1 = tiimi 1, 2 = tiimi 2, 3 = tiimi 3, 4 = tiimi 4, 5 = tiimi 5, 6 = tiimi 6; k : 1 = saha 1, 2 = saha 2, 3 = selluloosatehdas 1, 4 = selluloosatehdas 2.

$j \setminus k$	1	2	3	4
1	2, 3	3, 1	2, 1	6, 2
2	2, 3	3, 3	2, 1	4, 3
3	2, 3	6, 4	2, 1	6, 2
4	2, 3	6, 4	2, 1	6, 2
5	3, 2	6, 4	3, 2	6, 2
6	4, 4	6, 4	4, 4	6, 2

räkkäisyys, että jokaisen toiminnon ajanmukainen jatkuminen (Palander 1995a). Tämän tutkimuksen meno-paluukuljetukset huomioiva puuvirtamalli perustui kuitenkin käsillä olevaa optimointiongelmaa linearisoivaan DLP-malliin (Dynamic Linear Programming) (Palanderin 1995b). DLP:llä tarkoitetaan sellaista lineaarisen ohjelmoinnin sovellutusta, jossa ongelman luonne ja systeemin kuvaus vaatii peräkkäisyyden ja/tai aikatekijän huomioimista.

Puuvirtamalleissa dynaamisuuden niin sanottu riittävä ehto tarkoitti kahden kuukauden suunnittelukauden jakamista kahden viikon jaksoihin – peräkkäisiin vaiheisiin, joissa systeemin mahdolliset tilavaihtoehdot sisälsivät mallitetut puunhankinnan muuttuvat toiminnot. Tilavaihtoehdot puolestaan sisälsivät jokaisen muuttuvan toiminnon kvantitatiivisen määrän kyseisen jakson aikana. Jäljempänä esitetään yleinen malli, jonka osia tässä tekstissä kuvataan numeroin. Muuttuvia puunhankinnan toimintoja olivat korjuu, meno- ja paluukuljetus sekä tienvarsi- ja tehdasvarastointi (4). Näin formuloituna mallit olivat homogeenisia jokaisessa vaiheessa myös tilojensa suhteen. Homogeenisuus tarkoittaa, että systeemissä on yhtä monta saman rakenteen sisältävää tilaa jokaisessa vaiheessa (Hadley 1964).

Puuvirtamalleissa dynaamisuuden välttämätön ehto – puunhankinnan toimintojen ajanmukainen jatkuminen – toteutettiin dynaamisilla yhtälöillä (5), joita on aiemmin käytetty myös tasapainoyhtälöinä optimaalisten puskurivarantojen ratkaisemiseen (Palander 1999). Dynaamisia yhtälöitä varten tien-

varsivarastoille määritettiin alkuvarastot kiintokuutiometreinä (6) ja niiden annettiin hakeutua vapaasti kohti toivottua tasapainotilaa suunnittelukauden aikana. Samalla tavalla määritettiin myös tehtaiden alkuvarastot, mutta tehdasvaraston määrälle määritettiin vaihteluvälit jokaiselle suunnittelujaksolle.

Tehtaiden puutilaukset (7) määritettiin etukäteen erikseen jokaiselle jaksolle. Meno-paluuuehdolla (8) määritettiin, että paluukuljetuksia on korkeintaan saman verran kuin sitä vastaavia menokuljetuksia. Määrällisillä rajoitteilla (9) määritettiin edellä mainitun tehdasvarastojen vaihteluvälin lisäksi korjattavan puumäärän vaihteluväli, tiimin alueelta kuljettavan ja tiimin kuljettaman puumäärän vaihteluväli sekä varmistettiin, että tiimin alueelta ei voinut kuljettaa enempää puuta kuin sillä oli varastossa tai enempää kuin se pystyi jakson aikana korjaamaan. Kaikille tavoitefunktion päätösmuuttujille määritettiin myös ei-negatiivisuusehto (10).

Tavoitefunktio:

$$\begin{aligned} \min Z = [& \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I cl_{ijt} L_{ijt} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K cy_{ijkt} Y_{ijkt} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K cyr_{ijkt} YR_{ijkt} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I cx_{ijt} X_{ijt} + \\ & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I cm_{ikt} M_{ikt}] \end{aligned} \quad (4)$$

Rajoitteet:

dynaamiset yhtälöt;

$$\begin{aligned} X_{ijt-1} - Y_{ijkt} - YR_{ijkt} + L_{ijt} &= X_{ijt} \\ M_{ikt-1} + Y_{ijkt} + YR_{ijkt} - D_{ikt} &= M_{ikt} \end{aligned} \quad (5)$$

alkuperäiset puuvarastot;

$$\begin{aligned} X_{ij0} &= XI_{ij} \\ M_{ik0} &= MI_{ik} \end{aligned} \quad (6)$$

tehtaiden puutilaukset;

$$Y_{ijkt} + YR_{ijkt} + M_{ikt-1} \geq D_{ikt} \quad (7)$$

meno-paluuuehto;

$$Y_{ijkt} - YR_{ijkt} \geq 0 \quad (8)$$

määrälliset rajoitteet;

$$M_{ikt} \leq M_{\max_{ikt}} \quad (9)$$

$$M_{ikt} \geq M_{\min_{ikt}}$$

$$L_{ijt} \leq L_{\max_{ijt}}$$

$$L_{ijt} \geq L_{\min_{ijt}}$$

$$Y_{ijt} + YR_{ijt} \leq Y_{T\max_{ijt}}$$

$$Y_{ijt} + YR_{ijt} \geq Y_{T\min_{ijt}}$$

$$Y_{ijt} + YR_{ijt} \leq L_{ijt} + X_{ijt}$$

Ei-negatiivisuusehdot:

$$Y_{ijkt}, YR_{ijkt}, L_{ijt}, X_{ijt}, M_{ikt} \geq 0 \quad (10)$$

Mallissa:

Z = minimoitava yhteinen kokonaistavoite (mk/m³)

L_{ijt} = tiimin j alueelta korjatun puutavaralajin i määrä jakson t aikana (m³)

Y_{ijkt} = tiimin j alueelta menokuljetuksena kuljetetun puutavaralajin i määrä jakson t aikana (m³)

YR_{ijkt} = tiimin j alueelta paluukuljetuksena kuljetetun puutavaralajin i määrä jakson t aikana (m³)

M_{ikt} = tehtaalla k varastossa olevan puutavaralajin i määrä jakson t aikana (m³)

X_{ijt} = tiimin j alueella tienvarsivarastossa olevan puutavaralajin i määrä jakson t aikana (m³)

cl_{ijt} = tiimin j alueelta kuljetetun puutavaralajin i kuljetuskustannus jakson t aikana

cy_{ijkt} = tiimin j alueelta tehtaalle k menokuljetuksena kuljetetun puutavaralajin i kuljetuskustannus jakson t aikana

cyr_{ijkt} = tiimin j alueelta tehtaalle k paluukuljetuksena kuljetetun puutavaralajin i kuljetuskustannus jakson t aikana

cm_{ikt} = tehtaalla k varastoidun puutavaralajin i varastointikustannus jakson t aikana

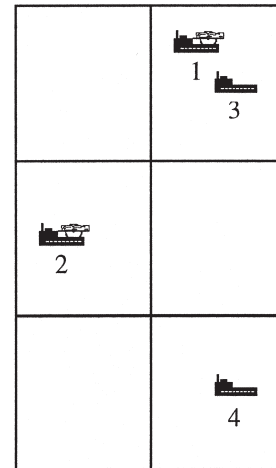
cx_{ijt} = tiimin j alueella tienvarsivarastossa varas-

- toidun puutavaralajin i varastointikustannus
jakson t aikana
- D_{ikt} = tehtaan k tarvitseman puutavaralajin i määrä
jakson t aikana (m^3)
- $L_{max_{ij}}$ = tiimin j alueelta korjatun puutavaralajin i
suurin sallittu määrä jakson t aikana (m^3)
- $L_{min_{ij}}$ = tiimin j alueelta hakatun puutavaralajin i
pienin sallittu tilavuus jakson t aikana (m^3)
- $YT_{max_{ijt}}$ = tiimin j alueelta kuljetetun tai tiimin h
kuljettaman puutavaralajin i suurin sallittu
määrä jakson t aikana (m^3)
- $YT_{min_{ijt}}$ = tiimin j alueelta kuljetetun tai tiimin h
kuljettaman puutavaralajin i pienin sallittu
määrä jakson t aikana (m^3)
- $M_{min_{ikt}}$ = tehtaan k varastossa olevan puutavaralajin i
pienin sallittu määrä jakson t aikana (m^3)
- $M_{max_{ikt}}$ = tehtaan k varastossa olevan puutavaralajin i
suurin sallittu määrä jakson t aikana (m^3)
- MI_{ik} = tehtaalle k varastoidun puutavaralajin i
määrä suunnittelukauden alussa (m^3)
- XI_{ij} = tiimin j alueella varastoidun puutavaralajin i
määrä suunnittelukauden alussa (m^3)
- T = suunnittelujaksojen lukumäärä (1, ..., 4)
- K = tehdasvarastojen lukumäärä (1, ..., 4)
- J = tiimien lukumäärä (1, ..., 6)
- I = puutavaralajien lukumäärä (1)

Vaikka DLP-menetelmällä saatiin vain lineaarinen ratkaisu optimointimallin kuvaamaan optimointiongelmaan, niin sen käyttö oli perusteltua, koska tois- taiseksi se on osoittautunut tehokkaimmaksi menetelmäksi dynaamisten systeemien optimoinnissa. Pääasiassa tämä johtuu Simplex-algoritmin tehokkuudesta. Tässäkin tutkimuksessa molemmat mallit ratkaistiin käyttäen menetelmässä Simplex-algorit- mia.

2.2 Tutkimusaineisto

Tutkimusta varten tehtiin kokeellinen puunhankin- taympäristö jäljitellen suuryrityksen puunhankintaa. Puunhankintaympäristöön sijoitettiin hankinta-alue, jossa oli kuusi tiimiä, kaksi sahaa ja kaksi selluloosa tehdasta. Se sovitettiin vastaamaan mittasuhteiltaan Pohjois-Karjalan pinta-alaa. Kaikki tiimit olivat yhtä suuria, kooltaan $3\,500\text{ km}^2$. Kaksi sahaa ja kaksi selluloosa tehdasta sijoitettiin samalle alueelle kuvan



Kuva 1. Puunhankinta-alue, jolle leimikkoaineisto generoitiin. Tiimien alueilla vaakasuorat sivut olivat 50 km ja pystysuorat sivut 70 km. Kuvassa tehtaat 1 ja 2 ovat sahoja; 3 ja 4 ovat selluloosa tehtaita.

1 mukaisesti. Tiimien alueille generoitiin satunnaisesti tutkimusjakson (2 kk) aikana myyntiin tulevat leimikot puustotietoineen ja sijaintipisteineen. Tämä leimikkoaineisto muodostettiin Oinaan ja Sika- sen (2000) kehittämän leimikkogeneraattorin mal- leilla, jotka perustuvat Pohjois-Karjalasta kerättyi- hin leimikko- ja metsäkuviotietoihin.

Myyntiin tulevien leimikoiden puumäärä mää- ritettiin Pohjois-Karjalasta vuonna 1998 ostetusta mäntytukin ja -kuitupuun yhteismäärästä, joka oli noin $1\,132\,000\text{ m}^3$ (Metsätilastollinen vuosikirja 1999). Tästä kokonaiskuutiomäärästä laskettiin kes- kimääräinen kahden kuukauden ostoa vastaava män- tytukin ja -kuitupuun kuutiomäärä, koska tarkem- pia puukauppamääriä ei ollut käytettävissä. Näin os- toksi saatiin noin $189\,000\text{ m}^3$. Ostos määrä voisi vaihdella vuodenajoittain: syksy on kiihkeintä puu- kaupan aikaa, mutta keväällä kauppoja syntyy suh- teessa vähiten. Tässä tutkimuksessa tällä vaihtelulla on tuskin merkitystä. Varsinainen puukaupan simu- lointi aloitettiin generoimalla jokaisen tiimin alueel- le kuusikymmentäseitsemän leimikkoja, joilla kertyi koko puunhankinta-alueelle riittävästi myytävänä olevaa mäntypuutavaralajia, $189\,164\text{ m}^3$.

Suuryrityksemme tavoitteli myytävistä leimikois- ta niitä leimikoita, joiden keskimääräinen mänty-

Taulukko 2. Tehtaan k puuntarve D_{ikt} , tehdasvarastot suunnittelukauden alussa Ml_{ik} ja tehdasvarantojen vaihteluvälit $Mmin_{ikt}, \dots, Mmax_{ikt}$ suunnittelujaksoilla (m^3).

k	D_{ikt}	$Mmin_{ikt}$	$Mmax_{ikt}$	Ml_{ik}
1	5000	5000	14000	6000
2	7000	7000	19600	11200
3	2000	2000	5600	4000
4	1400	1400	3920	2800

puutavaralajien tilavuus ylitti $100 m^3/ha$, eli painotettiin ostoaan järeää puuta sisältäviin leimikoihin. Tällä rajoitteella leimikoiden mäntypuutavaralajimäärä pieneni 81 prosenttiin koko mäntypuutavaralajimäärästä eli 152 894 kuutiometriin. Pois rajautuneet leimikot olivat lähinnä harvennusleimikoita. Oston toteutumista jäljiteltiin malleilla, joissa oli ostajan tietoisuus- ja myyjän myyntihalukkuusprosentit (Oinas ja Sikanen 2000). Yritys sai leimikon jos todennäköisyys, että yritys tiesi myytävänä olevasta leimikosta ja myyjä oli halukas myymään sen yritykselle ylitti 70 prosenttia. Tämä todennäköisyys määritettiin yrityksen tavoitteleman markkinaosuuden perusteella, jona pidettiin 30 prosenttia. Mallissa markkinaosuuden nosto edellytti myös oston onnistumisen todennäköisyyden kasvua. Määritetyillä rajoitteilla yrityksen lopullinen osuus tutkimusalueen mäntypuutavaramarkkinoista oli 33 prosenttia eli 63 139 kuutiometriä.

2.3 Meno-paluukuljetuksien kannattavuus

Kannattavuuden selvittämiseksi puuvirrat optimoitiin tiimien alueilta tehtaille sekä meno-paluukuljetukset huomioivalla puuvirtamallilla, että vastaavalla puuvirtamallilla, jossa oli kuljetustavoite ainoastaan menokuljetuksille. Tässä tapauksessa optimointiongelman ratkaiseminen edellytti kerran tapahtuvaa mallin tavoitefunktion uudelleen formulointia. Koska molempien mallien rajoitteet pidettiin samantaisina eli käytettävissä olevat resurssit vakioitiin, kyseessä oli taktiseksi luokiteltava suunnittelu- tai päätöksentekotilanne. Tässä kokeellisessa tutkimusympäristössä rajoitteet määritettiin pystyvarannon leimikoiden leimikkotunnusten perusteella.

Taulukko 3. Tienvarsivarastot Xl_{ij} suunnittelukauden alussa sekä korjattavan $Lmin_{jt}, \dots, Lmax_{jt}$ että kuljetettavan $Ylmin_{jt}, \dots, Ylmax_{jt}$ puumäärän vaihteluvälit suunnittelukauden aikana (m^3). Taulukossa i = puutavaralaji; j = tiimin alue.

j	Xl_{1j}	Xl_{2j}	$Lmin_{1jt},$ $Ylmin_{1jt}$	$Lmax_{1jt},$ $Ylmax_{1jt}$	$Lmin_{2jt},$ $Ylmin_{2jt}$	$Lmax_{2jt},$ $Ylmax_{2jt}$
1	33600	9180	1540	2040	360	460
2	22800	4760	2480	2980	880	980
3	31200	4760	2330	2830	710	810
4	33600	5780	570	1070	130	230
5	36000	9180	1690	2190	480	580
6	33600	8500	670	1170	290	390

Tehtaiden puuntarve (taulukko 2) määritettiin niin, ettei se ylittänyt tiimien toimituskykyä. Suunnittelukauden varannot määritettiin käyttäen apuna Korpilahden (1990) esittämiä valtakunnallisia keskiarvolukuja tienvarsi- ja tehdasvarantojen vaihteluvälille. Määrät on esitetty varantojen kuukausittaisena riittävytenä tehtaan puuntarpeen suhteen. Jokaisen tehtaan alkuvarasto arvottiin satunnaisesti väliltä 0,5–1,4 kk, mitä käytettiin myös varastojen vaihteluvälinä suunnittelujaksoilla.

Samalla tavalla tiimien tienvarsivarastojen alkuvarastot arvottiin satunnaisesti väliltä 1,4–3,3 kk (taulukko 3). Suunnittelukauden aikana tienvarsivarastoja ei rajoitettu, vaan niiden sallittiin sopeutua vapaasti systeemiä kuvaavan mallin muutoksiin. Sitä vastoin tiimien alueelta korjattavalle ja kuljetettavalle puumäärälle määritettiin vaihteluvälit suunnittelukaudella ostetusta pystyvarannosta. Puumäärästä laskettiin kahta viikkoa vastaava ostomäärä, jota käytettiin jokaisen tiimin alueella vaihteluvälän ylärajana molemmille toimintoille. Alaraja määritettiin tukille $500 m^3$ ja kuidulle $100 m^3$ pienemmäksi kuin ylärajana.

Puuvirtamalleissa käytettyihin korjuun yksikkökustannuksiin sisällytettiin sekä oston, että puun korjuun kustannukset (taulukko 4). Mäntytukilla kantohinnan osuus yksikkökustannuksista oli kaikilla alueilla $200 mk/m^3$ ja mäntykuitupuulla $100 mk/m^3$. Loput yksikkökustannukset sisälisivät hakkuun- ja lähikuljetuksen yksikkökustannukset sekä organisaatiokulut, jotka vaihtelivat hieman tiimeittäin. Tehdasvarastoinnin yksikkökustannukset mää-

Taulukko 4. Puuvirtamalleissa käytetyt yksikkökustannukset (mk/m³). Taulukon lyhenteiden selitykset ovat yleisen puuvirtamallin selityksissä.

<i>j</i>	<i>cl_{1jt}</i>	<i>cl_{2jt}</i>	<i>cm_{1kt}</i>	<i>cm_{2kt}</i>	<i>cx_{1jt}</i> & <i>cx_{2jt}</i>	<i>cy_{ij1t}</i>	<i>cy_{ij2t}</i>	<i>cy_{ij3t}</i>	<i>cy_{ij4t}</i>	<i>cr_{yij1t}</i>	<i>cr_{yij2t}</i>	<i>cr_{yij3t}</i>	<i>cr_{yij4t}</i>
1	270	140	9	10	5	22	31	23	58	14	24	14	32
2	270	140	9	10	5	4	39	4	53	4	21	4	28
3	265	145	9	10	5	38	5	37	35	21	19	21	19
4	265	145	9	10	5	31	23	30	26	17	21	17	21
5	260	150	9	10	5	62	24	61	24	32	21	32	21
6	260	150	9	10	5	59	33	57	5	30	19	29	19

ritettiin erikseen molemmille puutavaralajeille, mutta tienvarsivarastoinnille käytettiin samoja yksikkökustannuksia molemmilla puutavaralajeilla.

Taulukossa 4 on myös sekä menokuljetuksien että paluukuljetuksien yksikkökustannukset. Menokuljetuksen yksikkökustannus laskettiin tiimin keskipisteen ja tehtaan välisestä suorasta etäisyydestä, jota painotettiin mutkittelukertoimella 1,3 ja vuoden 1998 raakapuun keskimääräisellä autokuljetusten yksikkökustannuksella 0,3 mk/m³/km (Metsätalostollinen vuosikirja 1999). Paluukuljetusten yksikkökustannuksina käytettiin kaikkien meno-paluureitillä ajettavien matkojen keskiarvoa, jota painotettiin myös samaisella mutkittelukertoimella ja raakapuun keskimääräisellä autokuljetusten yksikkökustannuksella. Meno-paluureitillä ajettavia matkoja olivat matkat lähtöpisteestä tehtaalle, tehtaalta tienvarsivaraston pisteeseen, josta paluukuljetus haettiin, sieltä tehtaalle, jonne paluukuljetus kuljetettiin ja paluumatka takaisin lähtöpisteeseen.

2.4 Meno-paluukuljetuksen kustannusvaikutukset

Meno-paluukuljetuksen kustannusvaikutukset selvitettiin vertaamalla meno-paluukuljetuksen toteutuneita yksikkökustannuksia menokuljetuksen toteutuneisiin yksikkökustannuksiin. Tätä varten takitiseen lähestymistapaan liitettiin myös operatiivisia piirteitä. Ensinnäkin yrityksen ostamat leimikot muodostivat pystyvarannon, josta valittiin sopivat leimikot molempiin kuljetustapoihin. Nämä valinnat olivat puuvirtamalleilla laadittujen kuljetussuunnitelmien mukaisia. Toisena operatiivisena piirtee-

Taulukko 5. Kuormaukseen ja purkuun kuluneet ajat, kuormien koot sekä tuntikustannukset.

Terminaaliajat, h		Kuormien koot, m ³		Tuntikustannus, mk/h	
Kuormaus	Purku	Tukki	Kuitupuu	Ajo	Kuormaus/ purku
1,5	0,5	49	47	380	285

nä kokeelliseen tutkimusympäristöön muodostettiin leimikoiden puumääristä kuormat, jotka käytännössäkin olisi kuljetettu tehtaalle. Tämän jälkeen laskettiin kuljetukseen tarvittu aika Kukon ym. (1990) kehittämällä menetelmällä. Vajaita kuormia ei kuitenkaan huomioitu. Menetelmän avulla laskettiin ensin täydellä ja tyhjällä kuormalla ajetuille matkoille ajonopeudet malleilla 11 ja 12, jonka jälkeen kaukokuljetukseen kulunut aika voitiin määrittää jakamalla ajonopeudet ajetuilla matkoilla.

$$V_f = 5.7917 + 30.63 \log(S_f) \quad (11)$$

$$V_e = -0.44591 + 31.695 \log(S_e) \quad (12)$$

missä

V_f = nopeus täydellä kuormalla

V_e = nopeus tyhjällä kuormalla

S_f = täydellä kuormalla ajettu matka

S_e = tyhjällä kuormalla ajettu matka

Yksikkökustannusten laskemiseksi määritettiin kuljetukseen kuluneen ajan lisäksi kuormaukseen ja purkuun kuluneet ajat, sekä kuormien koot. Kaik-

ki edellä mainitut osatekijät oletettiin samanlaisiksi jokaisen tiimin alueella (taulukko 5). Kuormaus- ja purkuajat sekä kuormien koot määritettiin Metsätehon puutavaran autokuljetuskustannusten laskentaohjelman ”Auton” oletusarvoista (Oijala ym. 1995). Tuntikustannuksina käytettiin Rinteen (2001) määrittämiä tuntikustannuksia. Tämän jälkeen kuljetuksen osavaiheiden kustannukset laskettiin kertomalla tyhjänä ja täytenä ajoin kulunut aika ajotuntikustannuksella sekä purkuun ja kuormaukseen kulunut aika kuormaus- ja purkutuntikustannuksilla. Kuorman kokonaiskustannus oli näiden osavaiheiden summa. Toteutuneet yksikkökustannukset saatiin lopulta jakamalla näin saatu kuljetuksen, kuormauksen ja puurun kokonaiskustannus kuorman koolla.

3 Tulokset

Optimoinnista saatiin tulokseksi kaksi kuljetussuunnitelmaa. Toinen meno-paluukuljetukset huomioivalle puuvirtamallille, ja toinen vastaavalle puuvir-

tamallille, joka huomioi vain pelkät menokuljetukset. Näin molempia kuljetustapoja voitiin analysoida asettamalla kuljetustavoitteet mallien mukaisesti. Meno-paluukuljetusmallin ratkaisu oli puunhankintaongelmassamme 17 920 mk edullisempi kuin menokuljetusmallin ratkaisu. Malleissa minimoitiin puunhankintaketjun kustannuksia.

Taulukossa 6 esitetään molemmat kuljetussuunnitelmat ja erot menokuljetusten kuljetusmäärissä. Suurimmat erot oli tiimin kaksi alueelta sahalle 1 jaksoilla yksi, kaksi ja neljä kuljetettavissa menokuljetuksissa. Meno-paluukuljetusmallin ratkaisussa menokuljetuksena kuljetettava puumäärä oli 880 m³ pienempi kuin menokuljetusmallilla saatu puumäärä. Muut selvät menokuljetusmallin käytön vaikutukset olivat tiimien viisi ja kuusi tuloksissa. Niissä menokuljetukset olivat pienempiä sahalle kaksi. Tiimien kolme ja neljä menokuljetukset erosivat kahden tehtaan osalta samalla tavalla. Esimerkiksi tiimin neljä alueelta meno-paluukuljetusmallin ratkaisussa sahalle 1 kuljetettava puumäärä oli 420 m³ pienempi jaksolla yksi. Seuraavalla jaksolla puumäärä oli saman verran suurempi. Ero sahalle 2 kul-

Taulukko 6. Menokuljetus- ja meno-paluukuljetusmallilla ratkaistut tiimin j alueelta tehtaalle k jaksolla t kuljetettavat menokuormat (m³). Kuljetusmäärät, joissa on eroja on lihavoitu. Taulukossa j : 1 = tiimi 1, 2 = tiimi 2, 3 = tiimi 3, 4 = tiimi 4, 5 = tiimi 5, 6 = tiimi 6; k : 1 = saha 1, 2 = saha 2, 3 = selluloosa tehdas 1, 4 = selluloosa tehdas 2; t : 1 = jakso 1, 2 = jakso 2, 3 = jakso 3, 4 = jakso 4.

k	$t \setminus j$	Menokuljetusmalli						Meno-paluukuljetusmalli					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
1	1	1540	2480	0	570	0	0	1540	1600	0	150	0	0
	2	1540	2720	0	150	0	0	1540	1840	0	570	0	0
	3	2020	2980	0	0	0	0	2020	2980	0	0	0	0
	4	2020	2980	0	0	0	0	2020	2100	0	0	0	0
2	1	0	0	2330	0	1690	670	0	0	2330	420	1690	380
	2	0	0	2330	420	1690	670	0	0	2330	0	1690	380
	3	20	0	2830	1070	2190	890	20	0	2830	1070	1910	600
	4	20	0	2830	1070	2190	890	20	0	2830	1070	1910	600
4	1	360	880	0	0	0	0	360	880	330	0	0	0
	2	360	880	710	0	0	0	360	880	710	0	0	0
	3	360	880	0	0	0	0	360	880	0	0	0	0
	4	360	880	330	0	0	0	360	880	0	0	0	0
5	1	0	0	710	130	480	290	0	0	380	130	480	290
	2	0	0	0	130	480	290	0	0	0	130	480	290
	3	0	0	710	130	480	290	0	0	710	130	480	290
	4	0	0	380	130	480	290	0	0	710	130	480	290

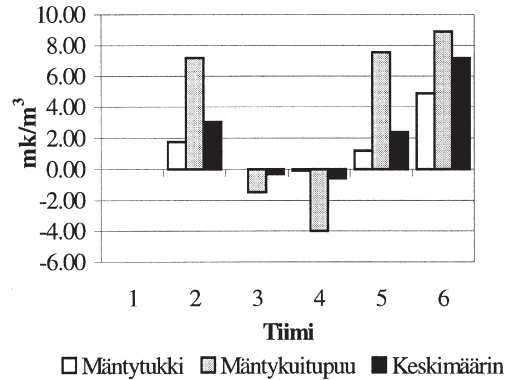
Taulukko 7. Paluukuljetuksina kuljetettava puumäärä (m^3) taulukon 1 mukaisilla toteuttamiskelpoisilla meno-paluukuljetusyhdistelmillä. Taulukossa j: 1 = tiimi 1, 2 = tiimi 2, 3 = tiimi 3, 4 = tiimi 4, 5 = tiimi 5, 6 = tiimi 6; k: 1 = saha 1, 2 = saha 2, 3 = selluloosa tehdas 1, 4 = selluloosa tehdas 2; t: 1 = jakso 1, 2 = jakso 2, 3 = jakso 3, 4 = jakso 4.

k	t \ j	1	2	3	4	5	6
1	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	0
3	1	0	880	0	0	0	0
	2	0	880	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0
	4	0	880	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	290
	2	0	0	0	0	0	290
	3	0	0	0	0	280	290
	4	0	0	0	0	280	290

jetettävissä puumäärissä oli yhtä suuri, mutta ero oli päinvastainen.

Taulukossa 7 esitetään meno-paluukuljetusmallin ratkaisusta paluukuljetukset. Ainoastaan tiimien kaksi, viisi ja kuusi oli kannattavaa kuljettaa meno-paluukuljetuksia. Tiimin kaksi kannatti kuljettaa jaksoilla yksi, kolme ja neljä omalta alueeltaan 880 m^3 mäntytkiä paluukuljetuksena sahalle 1 viedessään saman verran mäntykuitupuuta menokuljetuksena selluloosa tehtaalle 1. Tiimin viisi puolestaan kannatti kuljettaa periodeilla kolme ja neljä tiimin kuusi alueelta 280 m^3 mäntytkiä paluukuljetuksena sahalle 2 viedessään saman verran mäntykuitupuuta menokuljetuksena selluloosa tehtaalle 2. Tiimin kuusi taas kannatti kuljettaa kaikilla periodeilla omalta alueeltaan 290 m^3 mäntytkiä paluukuljetuksena sahalle 2 viedessään mäntykuitupuuta selluloosa tehtaalle 2.

Meno-paluukuljetuksen kustannusvaikutus selvitettiin laskemalla erot operatiivisten kuljetusten toteutuneissa yksikkökustannuksissa. Kustannusvai-



Kuva 2. Erot kuljetusten toteutuneissa alueellisissa yksikkökustannuksissa (mk/m^3).

kutus oli sekä positiivinen että negatiivinen ja erot nähdään kuvassa 2. Positiivisista kustannusvaikutuksista suurin ilmeni yksikkökustannuksien erona tiimin kuusi kuljetuksissa. Sen meno-paluukuljetusten yksikkökustannukset olivat mäntytkillä 4,87 mk/m^3 , mäntykuitupuulla 8,90 mk/m^3 ja molemmilla keskimäärin 7,16 mk/m^3 pienemmät kuin pelkillä menokuljetuksilla. Tiimin viisi meno-paluukuljetusten yksikkökustannukset olivat pienemmät sekä mäntytkillä (1,18 mk/m^3), mäntykuitupuulla (7,55 mk/m^3) että molemmilla keskimäärin (2,38 mk/m^3). Myös tiimin kaksi meno-paluukuljetusten yksikkökustannukset olivat pienemmät, mäntytkillä 1,75 mk/m^3 ja mäntykuitupuulla 7,18 mk/m^3 . Molempien puutavaralajien keskimääräisissä yksikkökustannuksissa ero oli 3,08 mk/m^3 meno-paluukuljetusten hyväksi.

Joidenkin tiimien alueilla kustannusvaikutukset olivat merkityksettömiä kuten tiimin yksi tapauksessa tai ne olivat osin tai kokonaan negatiivisia (kuva 2). Tiimin kolme mäntytkin yksikkökustannuksissa ei ollut eroja, mutta mäntykuitupuulla ero oli 1,48 mk/m^3 menokuljetusten hyväksi. Myös keskimääräiset yksikkökustannukset olivat 0,31 mk/m^3 pienemmät. Samoin tiimin neljä mäntytkin yksikkökustannukset olivat 0,08 mk/m^3 , mäntykuitupuun 4,00 mk/m^3 ja molempien keskimäärin 0,59 mk/m^3 pienemmät menokuljetuksilla. Kaiken kaikkiaan hankinta-alueen yhteiset meno-paluukuljetusten yksikkökustannukset olivat mäntytkillä 1,16 mk/m^3 , mäntykuitupuulla 3,82 mk/m^3 ja molemmilla keskimäärin 2,49 mk/m^3 .

millä puutavaralajeilla keskimäärin 1,70 mk/m³ pienemmät kuin menokuljetuksilla.

4 Tulosten tarkastelu

Meno-paluukuljetukset huomioiva puuvirtamalli osoittautui teoriassa käyttökelpoiseksi puunhankinnan taktisen suunnittelun apuvälineeksi. Palanderin (1995a) esittämään puuvirtamalliin nähden meno-paluukuljetukset huomioiva puuvirtamalli sopi puunhankintaongelman mallintamiseen paremmin, koska se huomioi myös paluukuljetukset. Muuten malleja on vaikea verrata keskenään, koska niitä ei ole testattu käytännössä.

Tutkimuksessa käytetty suunnitteluongelman kokonaisvaltainen ratkaisumenetelmä erotti tämän meno-paluukuljetukset huomioivan lähestymistavan muista operatiivisissa sovellutuksissa käytetyistä malleista ja menetelmistä. Tässä menetelmässä Simplex-algoritmi ratkaisi puuvirtamallin ja operatiiviset leimikot ja kuormat allokoitiin erikseen vasta puuvirtojen optimoinnin jälkeen. Puuvirtojen optimointi näyttäisi olevan menetelmän etu, koska sillä varmistettiin, että myös operatiivinen kuormien jakaminen perustui nykykäsityksen mukaiseen puunhankinnan taktiseen suunnitteluun.

Nykyaikaisilta pöytä tietokoneilta mallin ratkaisuun kului vain muutamia sekunteja, joten suuri muuttujamäärä ei ollut rajoitteena meno-paluukuljetusten lineaariselle taktiselle mallinnukselle. Dynaamisuus tosin nelinkertaisti tavoitefunktion muuttujamäärän staattiseen lineaariseen malliin verrattuna. Tästä syystä onkin oletettavaa, että muuttujamäärän edelleen kasvaessa myös mallin ratkaisuun käytetyille mikrotietokoneille asetetut vaatimukset kasvavat. Toisaalta, Palander (1998) on käyttänyt vastaavan kokoisia malleja ryhmäpäätöksentekotilanteissa toteamatta mallin koon aiheuttamia ongelmia.

Tärkein tekninen ero Ruotsin puunhankintaympäristöön laaditun Carlssonin ja Rönnqvistin (1998) esittämän taktisen suunnittelumallin ja tämän tutkimuksen meno-paluukuljetukset huomioivan mallin välillä oli, että tässä mallissa huomioitiin pelkien kuljetusten sijaan puunhankintaketju laajemmin ja puunhankinnan toimintojen ajallinen jatkuminen. Vaikka puuvirtamallin tuloksia analysoitiin

vain kuljetustavoitteiden kannalta, vaikuttivat myös muut asetetut tavoitteet, dynaamisten yhtälöiden ansiosta, saatuihin tuloksiin.

Toinen mallien välinen tekninen ero oli kuljetusten reitityksessä. Carlssonin ja Rönnqvistin (1998) mallissa kaikista mahdollisista menokuljetusreiteistä määritettiin kannattavat meno-paluukuljetusreitit. Tässä tutkimuksen sitä vastoin jokaista menokuljetusta kohti määritettiin yksi paluukuljetusmahdollisuus, joka täytyi kuljettaa tietyn tiimin alueelta tietylle tehtaille. Yksikkökustannusten perusteella määrytyi, mistä, minne ja kuinka paljon puuta kannatti paluukuljetuksena kuljettaa. Tässä suhteessa tämän menetelmän etuna oli, että optimointimallissa oli mukana kaikki mahdolliset menokuljetukset, eikä meno-paluukuljetukset näin ollen rajoittaneet muita kuljetuksia. Paluukuljetukset vähensivät vain menokuljetuksina kuljetettavaa puumäärää.

Tämän tutkimuksen kuljetussuunnitelmien välillä oli vain pieniä eroja, joten taktinen meno-paluukuljetusmalli muutti puunhankintaongelmassa vain vähän kuormien allokoiminnin lähtökohtia. Joitakin selviä muutoksia oli kuitenkin havaittavissa. Merkittävimmät erot tiimien kaksi, viisi ja kuusi menokuljetuksissa johtuivat siitä, että ne kuljettivat meno-paluukuljetukset huomioivassa kuljetussuunnitelmassa vastaavan määrän puuta paluukuljetuksina. Esimerkiksi tiimin viisi alueelta kuljetettava puumäärä oli pienempi, koska se kuljetti erotusta vastaavan määrän puuta paluukuljetuksena tiimin kuusi alueelta.

Paluukuljetukset jäivät melko vähäisiksi. Tähän vaikutti muun muassa tehtaiden sijainnit. Järkeviä paluukuljetuksia ei vain muodostunut, kun puuta ei tarvinnut kuljettaa todella kaukana lähtöpisteestä sijaitseville tehtaille. Pientä lisäystä saatiin hankinta-alueen sisäiseen paluukuljetusten määrään ratkaisemalla mallit uudelleen tilanteessa, jossa osa puista oli pakko kuljettaa mahdollisimman kaukana lähtö-alueista sijaitseville tehtaille sekä tilanteessa, jossa tehtaat sijaitsivat mahdollisimman kaukana toisistaan. Lisäys paluukuljetusten määrässä oli kuitenkin niin pientä, ettei näille ratkaisuille nähty järkeväksi enää laskea eroja kuljetusten toteutuneissa yksikkökustannuksissa. Toteutuakseen meno-paluukuljetukset näyttäisivät vaativan tämän tutkimuksen kuljetusmatkoja pitempiä matkoja, mutta silloin esim. rautatiekuljetuksien edullisuus autokuljetuksiin näh-

den kasvaa rajoittaen meno-paluukuljetusmahdollisuuksia.

Malleihin määritetyt yksikkökustannukset vaikuttivat myös oleellisesti paluukuljetusten määrään, koska malli osin niiden perusteella ratkaisi meno-paluukuljetusten kannattavuuden. Toisaalta paluukuljetukset näyttivät lisääntyvän tutkimusjakson loppua kohti ja niitä olikin eniten viimeisellä jaksolla. Dynaamiset yhtälöt on alun alkaen laadittu ottamaan huomioon puuvirrassa tapahtuvat muutokset ja niiden avulla mallitettujen systeemien on osoitettu parhaassa tapauksessa hakeutuvan tasapainotilaan (Palander 1999). Koska meno-paluukuljetuksia oli eniten viimeisillä periodeilla on mahdollista, että meno-paluukuljetusten määrä olisi suurimmillaan systeemin ollessa tasapainotilassa. Puunhankintaongelman mukaan määritetyt puskurivaranot olivat kuitenkin suhteellisesti liian pienet, jotta mallitettu systeemi olisi ehtinyt saavuttaa tasapainotilan. Voidaan myös esittää, että jos käytetty suunnittelujakso olisi ollut pidempi kuin kaksi kuukautta tai käytössä olisi ollut suurempi hankinta-alue, olisi paluukuljetuksia saattanut olla enemmän. Nämä viimeksi mainitut esitykset edellyttäisivät kuitenkin lisätutkimuksia.

Erot mäntytkin operatiivisten kuljetuksien toteutuneissa yksikkökustannuksissa olivat selvästi pienemmät kuin mäntykuitupuun yksikkökustannuksissa. Tämä johtui siitä, että tiimien kaksi, viisi ja kuusi meno-paluukuljetusten menokuormat allokoitiin selluloosa tehtaille ja paluukuormat sahoille. Tukiin paluukuormille jouduttiin kohdistamaan pidempi tyhjänä ajettu matka kuin menokuormille, mikä osaltaan vaikutti yksikkökustannuksiin. Johtopäätökset meno-paluukuljetusten kustannusvaikutuksista tehtiinkin tämän vuoksi mäntytkin ja -kuitupuun keskimääräisistä yksikkökustannuksista. Näin lasien hankinta-alueen kuljetuksissa positiivinen kustannusvaikutus oli meno-paluukuljetuksilla 4,1 %. Lukujen perusteella meno-paluukuljetusten käyttäminen näyttäisi olevan kannattavaa.

Kustannusvaikutukset vaihtelivat kuitenkin tiimeittäin. Tiimin kuusi keskimääräiset yksikkökustannukset olivat meno-paluukuljetuksilla 7,2 % pienemmät, koska sen alueelta kuljetettiin eniten paluukuormia. Tiimin itsensä lisäksi myös tiimi viisi kuljetti paluukuormia sen alueelta ja vähensi näin sen kalliimmiksi osoittautuneita menokuormia. Ti-

min viisi kuljetuksissa vastaava ero oli 2,4 % ja tiimin kaksi 3 %. Kuormien allokoinnin lisäksi tiimien kuljetusten yksikkökustannuksiin vaikutti kuljetussuunnitelmiin valittujen leimikoiden maantieteellinen sijainti. Varsinkin tiimin kuusi kuljetuksiin valittiin erilaisia leimikoita riippuen kuljetussuunnitelmasta. Parhaan kuvan leimikoiden sijainnin kustannusvaikutuksesta saa tiimien kolme ja neljä yksikkökustannuksien eroista. Ne aiheutuivat ainoastaan leimikoiden maantieteellisestä sijainnista ja olivat molemmilla tiimeillä meno-paluukuljetusten kyseessä ollessa noin 0,5 % suuremmat kuin menokuljetuksilla.

Tulosten perusteella meno-paluukuljetuksen säästöt kuljetusten yksikkökustannuksissa voisivat varovaisen arvion mukaan olla 2–3 % ja optimistisen arvion mukaan 3,5–4,5 %, jos oletetaan, että leimikoiden sijainnin vaikutus voi olla joko negatiivista tai positiivista. Jälkimmäinen arvio on lähellä Carlssonin ja Rönnqvistin (1999) arviota meno-paluukuljetusten tuomista 3,9–4,6 %:n säästöistä. Vaikka organisaatiossa puunhankintaketjun kannattavuuden kohentuminen jäi vähäisemmäksi, jopa alle 1 %:n, voitaneen olla yksimielisiä, että pienet säästöt ovat mahdollisia. Tuloksia yleistettäessä on kuitenkin syytä huomioida, että tässä tutkimuksessa meno-paluukuljetuksien kustannusvaikutuksia selvitettiin puunhankintaympäristössä, joka vastaa kahden Case-tutkimuksen vertailua. Tämän tutkimuksen tulokset ovat kuitenkin hyvä lähtökohta miettiä niitä syitä, jotka aiheuttavat meno-paluukuljetuksien soveltamisen vaikeudet. Tässä suhteessa tarkastelussa tuotiin esille vain tärkeimpiä tutkimuksen malleilla ja menetelmillä havaittuja epäkohtia. Viimekädessä tarvittavat kustannus/hyöty-analyysit meno-paluukuljetuksien tarpeellisuuden toteamiseksi ovat aina soveltajan harkinnassa.

Kiitokset

Tämä tutkimus oli osa projektia ”Ryhmäpääöstuki puunhankinnassa, Group Decision Support for Timber Procurement”. Projektia rahoittaa Suomen akatemia, ja projektin yksi tavoite on kehittää järjestelmiä ja apuvälineitä ryhmäpääöksenteon ja johtamisen tarpeisiin. Lisäksi halumme kiittää MMT

Lauri Sikasta yhteistyöstä leimikkoaineiston simuloinnissa.

Kirjallisuus

- Bailey, G.R. 1973. Wood allocation by dynamic programming. Canadian Forestry Service, Ottawa, ON, Publication 1321.
- Beaujon, G.J. & Turnquist, M.A. 1991. A model for fleet sizing and vehicle allocation. *Transportation Science* 25(1): 19–45.
- Carlsson, D. & Rönnqvist, M. 1999. Wood flow problems in Swedish forestry. Skog Forsk, Report 1. s. 26–29.
- Dejax, P.J. & Crainic, T.G. 1987. Survey paper: a review of empty flows and fleet management models in freight transportation systems. *Transportation Science*, 21(4): 227–247.
- Dijkstra, D.P. 1992. Mathematical programming for natural recourse management. McGraw-Hill Inc., New York. 318 s.
- Gelinas, S., Desrochers, M. & Desrosiers, J. 1995. A new branching strategy for time constrained routing problems with application to backhauling. *Annals of Operations Research* 61: 91–109.
- Hadley, G. 1964. Nonlinear and dynamic programming. Addison-Wesley Publishing Company. Inc., Reading, MA. 484 s.
- Jordan W.C. & Burns, L.D. 1984. Truck backhauling on two terminal networks. *Transportation Research* 18B(6): 487–503.
- Korpilahti, A. 1990. Puunhankinnan kausivaihtelun vaikutuksesta puuvirtaan, resurssien käyttöön ja hankintakustannuksiin. *Metsätehon tiedotus* 404. 10 s.
- Kukko, T., Lahti, K. & Torpo, J. 1990. Puutavara-autotarpeen määrittäminen annetuissa olosuhteissa. Puunkorjuun ja kaukokuljetuksen harjoitustyö. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos. 12 s.
- Lohmander, P. 1989. Stochastic dynamic programming with a linear programming subroutine: application to adaptive planning and coordination in forest industry enterprise. Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Economics, Report 93. 51 s.
- 1991. The optimal dynamic production and stock levels under the influence of stochastic demand and cost functions : theory and application to the pulp industry enterprise. Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Economics, Report 138 s.
- 1992. Decision optimization with stochastic simulation subroutines: relation to analytical optimization of capacity investment and production. Swedish University of Agricultural Sciences, Dept. of Forest Economics, Report 148. 51 s.
- Metsäntutkimuslaitos. 1999. Metsätilastollinen vuosikirja 1999. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä. s. 190–191.
- Oijala, T., Rajamäki, J. & Rumpunen, H. 1995. Puutavaran autokuljetuksen kustannusten laskentaohjelma ”Auto”. Versio 3. Metsäteho.
- Oinas, S. & Sikanen, L. 2000. Discrete event simulation model for purchasing marked stands, timber harvesting and transportation. *Forestry* 73(3): 283–301.
- Palander, T.S. 1995a. A dynamic analysis of interest rate and logging factor for reducing saw timber procurement cost. *International Journal of Forest Engineering* 7(1): 29–40.
- Palander, T. 1995b. Local factors and time-variable parameters in tactical planning models: a tool for adaptive timber procurement planning. *Scandinavian Journal of Forest Research* 10: 370–382.
- 1998. Tactical models of wood-procurement teams for geographically decentralized group decision making. D.Sc. (Agr. and For.) thesis. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 152 s.
- 1999. A hierarchical participatory methodology for tactical decision-making based on a decision-analytic model for balancing timber stock. *Scandinavian Journal of Forest Research* 14: 567–580.
- Potvin, J.Y., Duhamel, C. & Guertin, F. 1996. A genetic algorithm for vehicle routing with backhauling. *Applied Intelligence* 6(4): 345–355.
- Toth, P., Vigo, D. 1999. A heuristic algorithm for the symmetric and asymmetric vehicle routing problem with backhauls. *European Journal of Operations Research* 113: 528–543.

22 viitettä