

Puutavaran sahauksen optimointi

Valtteri Vironmäki

Perustieteiden korkeakoulu

Kandidaatintyö
Espoo 25.3.2024

Vastuuopettaja

Prof. Ahti Salo

Työn ohjaaja

DI Jussi Leppinen

Copyright © 2024 Valtteri Vironmäki

All rights are reserved.

Tekijä Valtteri Vironmäki

Työn nimi Puutavaran sahauksen optimointi

Koulutusohjelma Teknistieteellinen kandidaattiohjelma

Pääaine Matematiikka ja systeemitieteet

Pääaineen koodi SCI3029

Vastuupettaja Prof. Ahti Salo

Työn ohjaaja DI Jussi Leppinen

Päivämäärä 25.3.2024

Sivumäärä 26

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tässä työssä tutkittiin puutavaran valmistuksen optimointia lineaarisena kokonaislukuoptimointitehtävänä. Optimointitehtävä muotoiltiin selkärepputehtävänä, joka ratkaistiin dynaamiseen optimointiin perustuvalla algoritmilla. Tutkimuskysymyksenä työssä oli selvittää, miten erilaiset yksikköhinnat eri puutavaratuotteille vaikuttavat materiaalikulutukseen, kun tarkastellaan eri kysyntätapauksia. Kysymys ratkaistiin simulaatiolla, jossa annetut satunnaisen kokoiset tukkipuut sahattiin edellä mainitun optimointimallin antamalla tavalla tuotteiksi. Tukkien sahaamista toistettiin, kunnes jokaisen tuotteen kysyntä täyttyi. Vertailtuja yksikköhintoja olivat tuotteiden markkinahinnat, tuotteiden tilavuus, sekä päivittyvä yksikköhinta, joka ottaa huomioon tuotannon ja kysynnän.

Päivittyvien yksikköhintojen havaittiin täyttävän kysynnät keskimäärin pienimillä raaka-ainekustannuksilla. Ero muihin yksikköhintoihin oli kysynnästä riippuen rahallisesti mitattuna muutaman prosentin luokkaa. Päivittyvät hinnat takasivat myös sen, että eri tuotteiden kysynnät täyttyivät lähes tulkoon yhtäaikaisesti, mistä voi olla etua varastoinnissa. Hyötyasteella, eli valmistetun puutavaran tilavuuden ja raaka-aineen tilavuuden suhteella, ei havaittu olevan suuria eroja eri yksikköhinnoilla. Tukin säteen ja hyötyasteen välillä havaittiin olevan yhteys.

Avainsanat Optimaalinen puutavaran valmistus, sahaus-simulaatio, selkäreppuongelma, dynaaminen optimointi

Author Valtteri Vironmäki

Title Optimizing lumber sawing

Degree programme Bachelor's Programme in Science and Technology

Major Mathematics and Systems Sciences **Code of major** SCI3029

Teacher in charge Prof. Ahti Salo

Advisor MSc (Tech.) Jussi Leppinen

Date 25.3.2024 **Number of pages** 26 **Language** Finnish

Abstract

In this study, the optimization of lumber production was investigated as a integer linear optimization problem. The optimization problem was formulated as a knapsack problem which was solved using an algorithm based on dynamic programming. The research question aimed to study how different pricing options for various lumber products affect material consumption with different demand scenarios. The question was studied through simulation, where randomly sized logs were processed into products with the optimization model. Logs were sawn until the demand for each product was satisfied. The pricing options that were compared were market prices, product volumes, and dynamic pricing that considers production and demand.

Dynamic pricing satisfied demands with the lowest raw material costs on average. The difference in costs compared to other pricing strategies was within a few percent. Dynamic pricing also ensured that the demands of different products were satisfied almost at the same time, which could be advantageous in inventory management. Yield efficiency is defined as the ratio of the volume of produced lumber to the volume of raw material. No significant differences in yield efficiency were observed between different pricing strategies. However, a relationship between log radius and yield efficiency was observed.

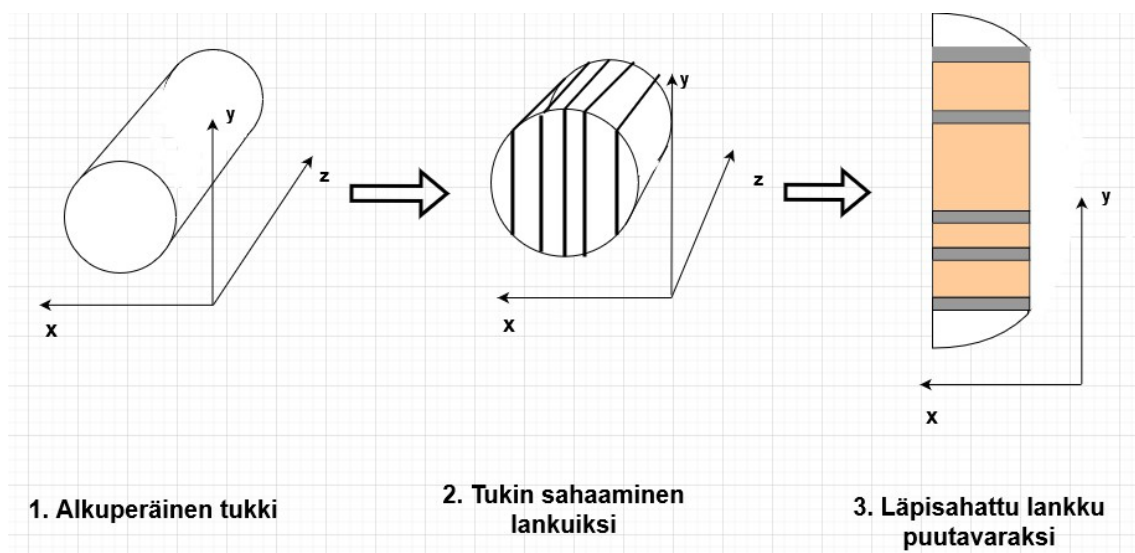
Keywords Optimal timber production, knapsack problem, dynamic programming

Sisällys

Tiivistelmä	3
Tiivistelmä (englanniksi)	4
Sisällys	5
1 Johdanto	6
2 Aikaisempi tutkimus	8
2.1 Tuotannonsuunnittelun optimointi	8
2.2 Sahausongelma aikaisemmassa tutkimuksessa	9
3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät	9
3.1 Dynaaminen optimointialgoritmi selkäreppuongelmaan	10
3.2 Tuotteiden yksikköhinnat	12
3.3 Simulaatio	12
4 Tulokset	13
4.1 Simulaatioasetukset	13
4.2 Optimointitavoitteet	14
4.3 Markkinahintaperustaiset tulokset	18
4.4 Leveysperustaiset tulokset	19
4.5 Dynaamiseen hintaan perustuvat tulokset	21
5 Yhteenveto	23

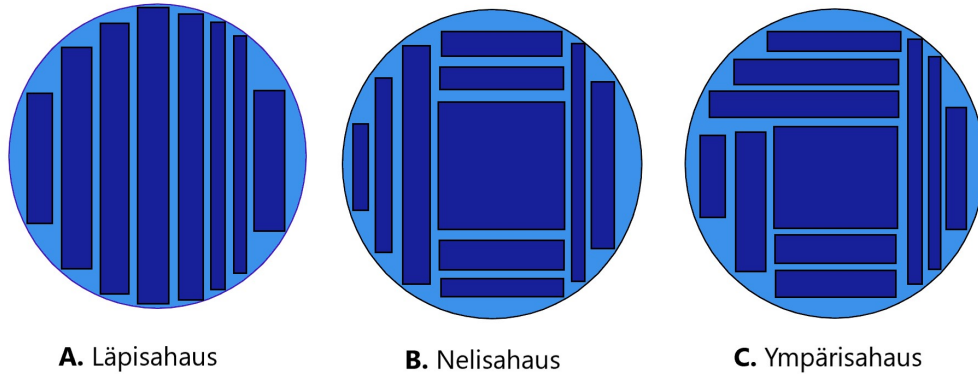
1 Johdanto

Puutavara valmistetaan sahaamalla tukkipuita joko vannesahalla, pyörösahalla tai molemmilla. Särmäämisellä tarkoitetaan prosessia, jossa läpisahatusta lankusta poistetaan epäsäännölliset reunat, jolloin syntyy suorakulmaista puutavaraa kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1: Särätyn puutavaran valmistaminen.

Särmäämiseen on erilaisia laitteistoja, jotka mahdollistavat myös särätyn lankun osittamisen vielä pienempiin osiin. Puutavaraa on monenlaista; esimerkiksi lankkua, lautaa ja rimaa. Myytävä puutavara voi olla myös vajaasärmäistä, jolloin lankkua ei ole särätty tai särämys ei ole täydellinen. Eri tuotteiden hintaan vaikuttavat muun muassa kysyntä, tuotteen mitat sekä laatuvaatimukset. Sahaustapoja on monia riippuen kysytystä puutavarasta ja saatavilla olevasta tukkipuumateriaalista. Eräitä sahausmenetelmiä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2: Erilaisia sahaustapoja.

Puutavaran valmistukseen sisältyy monenlaisia epävarmuuksia ja tehtäviä päätöksiä. Epävarmuuksia ovat esimerkiksi saatavilla oleva raaka-aine ja sen laatu, sekä eri mittaisten puutavaratuotteiden kysyntä tulevaisuudessa. Päätökset taas liittyvät siihen, kuinka tarjolla oleva raaka-aine tulisi sahata, jotta syntyvät varastot palvelevat kysyntää parhaiten.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan tukkipuun sahaamista puutavaraksi yhden ulottuvuuden ongelmana. Tavoitteena on selvittää, miten erilaiset yksikköhinnat eri puutavaroille vaikuttavat sahattavien tukkipuiden määrään, kun tarkastellaan erilaisen kysynnän tapauksia. Työssä toteutetaan dynaamista optimointia hyödyntävä *knapsack*-ongelman ratkaiseva algoritmi. Tätä algoritmia käytetään päättäessä, mikä leveyden puutavaraa kustakin läpisahatusta lankusta on annetuilla puutavaran yksikköhinnoilla sahattava, jotta tuotto maksimoituisi. Työssä vertaillaan keskenään kolmea erilaista puutavaran hinnoittelua ja sitä, miten nämä vaikuttavat optimaaliseen sahaustapaan. Vertailu tehdään simuloinnilla. Lisäksi tarkastellaan kuinka monta tukkia täytyy sahata, jotta kysyntää vastaava puutavara saadaan valmistettua. Jokaisella puutavaran hinnoittelulla maksimoitava tuotto määräytyy tuotettujen puutavaratuotteiden määrän sekä näiden yksikköhintojen tulona. Ensimmäiseksi puutavara sahataan siten, että jokaisella sahauksella pyritään maksimoidaan rahallinen tuotto. Tällöin yksikköhinta vastaa markkinahintaa. Toiseksi maksimoidaan tuotetun puutavaran tilavuus eli minimoidaan hävikkiä. Tällöin puutavaratuotteen yksikköhintana on tuotteen tilavuus. Kolmanneksi jo valmistetun puutavaran määrä suhteutetaan sen kysyntään. Tällöin yksikköhinta on tuotteen dynaaminen yksikköhinta.

Rajaukset ja yksinkertaistukset työssä liittyvät erityisesti raaka-aineeseen, sahaustapaan sekä tarkasteltavaan puutavaravalikoimaan. Raaka-aine, eli tukkipuut, käsitellään suorina ympyrälieriöinä, eli sylintereinä, jolloin käsiteltävänä ongelmana on olennaisesti optimaalisten suorakulmioiden löytäminen ympyrän sisältä tietyin rajoituksin. Erilaisista sahaustavoista käytetään nyt vain *läpisahausta*. Tässä työs-

sä sahattavien puutavaroiden paksuuden oletetaan olevan vakio. Lisäksi oletetaan, että tukista sahattavien lankkujen paksuus on vakio. Tämä yhdistettynä läpisahaustapaan pelkistää ongelman yksiulotteiseksi.

2 Aikaisempi tutkimus

2.1 Tuotannosuunnittelun optimointi

Tähän työhön liittyviä, tutkimuskirjallisuudessa ja alalla jo pitkään sovellettuja, samankaltaisia optimointitehtäviä on esitetty erilaisille *pakkausongelmille* (*packing problems*), joita ovat esimerkiksi *raaka-aineen leikkaus-ongelma* (*cutting stock problem*), *selkäreppuongelma* (*knapsack problem*), sekä *giljotiinileikkaukseen* (*guillotine cutting*) liittyville ongelmille. Näitä teemoja sivutaan myös aikaisemmassa optimaalisen sahaustavan tutkimuksessa (esim. [Geerts, 1984](#)).

Raaka-aineen leikkaus-ongelman esitti alunperin Kantorovich jo vuonna 1939 ([Kantorovich, 1960](#)). Kyseinen ongelma on matematiikassa sekä operaatiotutkimuksessa käsitelty ongelma, jossa selvitetään, miten standardikokoiset kappaleet täytyy leikata varastomateriaalista (*stock sheet*), jotta hävikki minimoitaisiin. Sovelluksia tälle ongelmalle on laajalti eri teollisuuden aloilla. Eräs sovellus ongelmalle on löytää optimaalinen leikkaustapa paperirullalle, kun annettuna ovat varastomateriaalina toimivan paperirullan mitat, eri paperiarkkituotteiden mitat sekä näiden kysynät. Tarkoituksena on löytää leikattavien arkkien joukko, joka minimoi hukkaan menevän materiaalin määrän varastomateriaalista. ([Kantorovich, 1960](#))

Selkäreppuongelma on toinen lineaarinen kokonaislukuoptimointiongelma. Se liittyy hyvin läheisesti edelliseen optimointitehtävään. Selkäreppuongelmassa pyritään löytämään kappalejoukosta optimaalinen osajoukko, joka maksimoi osajoukon kappaleiden yhteenlasketun arvon, kun osajoukon kokoa on rajoitettu. Ongelman nimi pohjautuuakin pyrkimykseen täyttää reppu mahdollisimman järkevästi. Muita sovelluksia ongelmalle löytyy laajalti hajauttamistehtävien parissa. Eräs erityistapaus ongelmalle on 0/1-selkäreppuongelma, jossa jokaisen kappaleen voi valita osajoukkoon vain kerran. ([Kellerer et al., 2004](#))

Giljotiinileikkaukset ovat läheistä sukua edeltäville ongelmille. Niissä tyyppisesti suorakulmion muotoisista raaka-aineista leikataan pienempiä, yleensä vakio-mittaisia, suorakulmioita. Tehtävänä on esimerkiksi löytää leikattavien kappaleiden joukko, joka maksimoi tuoton. Rajoitteena on, että leikkaukset voidaan suorittaa raaka-aineeseen vain kohtisuorassa, ja siten että leikkaus halkaisee koko kappaleen. Tätä kutsutaan giljotiinileikkaukseksi. Giljotiinileikkaus on käytännön vaatimus useissa teollisuuden prosesseissa, kuten lasin ja metallin leikkauksessa, ja myös puun sahausessa, kun käytössä on vannesaha. ([Scheithauer, 2018](#))

Yhteistä näille kaikille ongelmille, ja yleisesti lineaarisille kokonaislukuoptimointiongelmille, on se, että hiemankin suuremmissa tehtävissä mahdollisten ratkaisuvaihtoehtojen lukumäärä on niin suuri, että kaikkien vaihtoehtojen laskeminen parhaimman löytämiseksi on vaivalloista. Sen takia ongelmiin on kehitelty erilaisia algoritmeja sekä heuristisia menetelmiä.

2.2 Sahausongelma aikaisemmassa tutkimuksessa

Geerts (1984) esittää menetelmän kaksiulotteiseen leikkaamisongelmaan puutavaran sahauskeskustissa. Algoritmi on luonteeltaan kaksivaiheinen giljottiinileikkausmenetelmä. Ensimmäisessä vaiheessa maksimoidaan tukista saatavien läpisahattujen lankkujen arvo. Vaiheessa kaksi maksimoidaan edellisessä vaiheessa syntyneistä läpisahattuista lankuista saatavan puutavaran arvo. Ensimmäisen vaiheen tavoitefunktio (lankun arvo) kuitenkin riippuu toisen vaiheen tuloksesta, joten toisen vaiheen tulosta käytetään ensimmäisen vaiheen lähtöarvona päättäessä, kuinka paksu lankku tulisi leikata. Lopullinen optimaalinen tulos saavutetaan käymällä läpi eri ratkaisuvaihtoehtoja kussakin vaiheessa. Optimoinnissa otettiin huomioon tukin huonolaatuinen ydin, eli läheltä tukin keskipistettä saadaan huonompilaatuista tavaraa. Lisäksi huomioon otettiin terän aiheuttama hukka. Geertsin mallissa tukin pituussuuntaa ei käsitelty, joten tukin kartiomaisuus ja mahdollinen käyryys jäivät huomiotta.

Aikaisemmin sahausongelmaa ovat käsitelleet myös Todoroki ja Rönnqvist (2002). Todoroki ja Rönnqvist käsitelivät sahauskeskustissa myös tukin pituusulottuvuutta. Tämän lisäksi huomioon otettiin raaka-aineen laatuiseikat, mitkä vaikuttivat siihen, kuinka hyvälaatuista tavaraa annettusta tukista oli mahdollista valmistaa. Työkäluna tutkimuksessaan Todoroki ja Rönnqvist käyttivät tukin sahauskeskustin simuloitiohjelmaa. Aineistona oli aikaisemmista sahaustutkimuksista kertynyttä dataa tukkien profiileista. Varsinaisena tutkimuskysymyksenä oli selvittää, miten optimointitavoitteet vaikuttivat käytetyn raaka-aineen määrään tilauskannan täyttämiseksi. Vertailtavat optimointitavoitteet olivat tukista saatavan puutavaran tilavuuden maksimointi, puutavaran arvon maksimointi markkinahinnan perusteella sekä puutavaran arvon maksimointi, joka perustui yksikköhintoihin, jotka ottivat huomioon kysynnän ja jo tuotetun tuotteiden lukumäärän suhteen. Viimeistä tavoitetta kutsuttiin myös tuotanto-optimoinniksi. Tutkimuksessa vertailtiin edeltä mainittujen tavoitteiden vaikutusta kolmelle eri tilauskannalle, joissa kysyntää eri laadun puutavaroille vaihdeltiin.

Tuloksena Todoroki ja Rönnqvist (2002) havaitsivat tuotanto-optimoinnin hyödyntävän raaka-aineen tehokkaimmin useissa vertailtavissa tilauskannoissa. Siinä käytettävien tukkien määrä oli pienin. Lisäksi tuotanto oli sujuvinta, koska eri tuotteiden kysynät täyttyivät lähestulkoon yhtä aikaa verrattuna muihin tapoihin. Erityisesti tämä näkyi tilauskannassa, jossa kaikkien laatuisten kysyntä oli yhtä suuri. Etu tuotteiden kysynnän yhtäaikaistamiselle täyttymiselle olisi varastointikulujen pieneeminen. Heikomman laadun puutavaran kysyntä oli paikoittain vaikea täyttää, koska raaka-ainetukit olivat keskimäärin hyvälaatuisia. Tähän ratkaisuksi esitettiin tukkien lajittelua, jolloin raaka-aineksi voitaisiin valita kysyntää parhaiten palvelevat tukit. Käytännössä laatu- ja pituusperusteinen lajittelu on kuitenkin monimutkainen tehtävä.

3 Tutkimusaineisto ja -menetelmät

Tässä luvussa kuvataan tutkimuskysymystä varten luodun simulaation kulku. Simulaatiolla verrataan, miten eri yksikköhinnat vaikuttavat materiaalikulutukseen. Luvussa käydään myös läpi menetelmä, jolla määritetään optimaalinen sahaustapa

jokaiselle lankulle. Lisäksi käydään tarkemmin läpi eri vertailun kohteena olevat yksikköhinnat, erityisesti dynaaminen yksikköhinta.

3.1 Dynaaminen optimointialgoritmi selkäreppuongelmaan

Tässä alaluvussa käydään läpi selkäreppuongelman ratkaiseva algoritmi. Tämä algoritmi, kuten muukin simulaatio, toteutettiin R-ohjelmointikielellä. Algoritmia hyödynnettiin päättäessä, miten tukin läpisahauksessa syntyneet lankut tulisi sahata pienemmiksi tuotteiksi.

Rajoittamaton selkäreppuongelma voidaan formuloida optimointitehtävänä (1). Erona 0/1-selkäreppuongelmaan on se, että eri kappaleita voidaan valita enemmän kuin yksi.

$$\begin{aligned}
 \max_x \quad & \sum_{i=1}^m c_i x_i \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i=1}^m a_i x_i \leq b \\
 & x_i \in \mathbb{Z} \\
 & x_i \geq 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

Optimointitehtävällä 1 on syötteenä eri kappaleiden arvot (yksikköhinnat) $\mathbf{c} \in \mathbb{Z}^m$, kappaleiden painot $\mathbf{a} \in \mathbb{Z}_+^m$ sekä repun painokapasiteetti $b \in \mathbb{Z}_+$. Päättömuuttuja \mathbf{x} on epänegatiivisista kokonaisluvuista koostuva vektori.

Scheithauer (2018) ratkaisee selkäreppuongelman Gilmoren ja Gomoryn menetelmällä. Algoritmi 1 on pseudokoodiesitys menetelmästä. Menetelmä edustaa dynaamista optimointia. Kyseisessä optimointiparadigmassa ongelma käsitellään osaongelmina rekursiivisesti. Algoritmi antaa maksimiarvon lisäksi myös maksimiarvon tuottavan päätös­muuttujan $\mathbf{x} \in \mathbb{Z}^m$.

Algoritmi 1 Gilmoren ja Gomoryn algoritmi

Annettuna: c, a, b
Palauttaa: $F(m, y)$ kun $y = 0, 1, \dots, b$. Ratkaisun \mathbf{x} $F(m, b)$:lle

```

 $F(1, y) := c_1 \lfloor y/a_1 \rfloor$  kun  $y = 0, 1, \dots, b$ 
 $i(y) := 0$  kun  $y = 1, \dots, a_1 - 1$  ja  $i(y) := 1$  kun  $y = a_1, \dots, b$ 
for  $k = 2, \dots, m$  do
   $F(k, y) := F(k - 1, y)$  kun  $y = 0, \dots, a_k - 1$ 
  for  $y = a_k, \dots, b$  do
    if  $F(k - 1, y) < F(k, y - a_k) + c_k$  then
       $F(k, y) := F(k, y - a_k) + c_k$ 
       $i(y) := k$ 
    else
       $F(k, y) := F(k - 1, y)$ 
    end if
  end for
end for
 $x_i := 0$  kun  $i = 1, \dots, m$  ja  $y := b$ 
while  $i(y) > 0$  do
   $i := i(y)$ 
   $x_i := x_i + 1$ 
   $y := y - a_i$ 
end while

```

Algoritmi palauttaa optimaalisen tuoton $F(m, y)$, missä m kuvaa eri tavaroiden lukumäärää, ja $y = 0, \dots, b$ painokapasiteetin eri arvoja. Algoritmi perustuu pienempien selkäreppuongelmien ratkaisuun rekursiivisesti. Tätä varten määritellään optimaalinen tuotto $F(k, y)$, missä $k \in \{1, \dots, m\}$ tarkoittaa nyt pienemmässä ongelmassa olevien kappalevaihtoehtojen lukumäärää, ja $y \in \{0, 1, \dots, b\}$ tarkoittaa repun jäljellä olevaa painokapasiteettia. Optimaalinen tuotto $F(k, y)$ määritellään seuraavasti:

$$F(k, y) := \max_{x_1, \dots, x_k} \left\{ \sum_{i=1}^k c_i x_i : \sum_{i=1}^k a_i x_i \leq y, x_i \in \mathbb{Z}_+ \right\}. \quad (2)$$

Jos käytössä on vain yksi kappale ($k = 1$), tällöin optimituotto on $F(1, y) = c_1 \lfloor y/a_1 \rfloor$ kaikille y :n arvoille. Kun $y = 0, \dots, b$ ja $k = 2, \dots, m$, seuraava rekursiokaava pätee:

$$F(k, y) = \max_j \left\{ j c_k + F(k - 1, y - j a_k) : j = 0, \dots, \lfloor y/a_k \rfloor \right\}. \quad (3)$$

Kun $y \geq a_k$, pätee seuraava:

$$F(k, y) = \max \left\{ F(k - 1, y), c_k + F(k, y - a_k) \right\}. \quad (4)$$

Algoritmin 1 kuudella viimeisellä rivillä esitetään menetelmä, joka palauttaa optimituottoa maksimoivan päätösmuuttujan \mathbf{x} . Muuttujaan $i(y)$ tallennetaan tieto, kuinka monella kappaleella saavutetaan painokapasiteettiin y liittyvä optimituotto.

Tämä tieto tallennetaan laskennan aikana jokaiselle y :n arvolle. Silmukka aloitetaan alkuperäisellä painokapasiteetilla $y = b$. Jos tiedetään, että optimituotto painokapasiteetille y on saavutettu $i = i(y)$ eri kappaleella, silloin i :nnen kappaleen täytyy esiintyä optimituloksessa vähintään kerran. Kappaleen i laskuri x_i kasvaa yhdellä. Tämän jälkeen silmukka alkaa alusta painokapasiteetilla, josta on vähennetty kappaleen i paino a_i . Samaa periaatetta jatketaan, kunnes $i(y) \leq 0$. Ratkaisu \mathbf{x} ei ole yksikäsitteinen kaikilla tehtävän lähtöarvoilla. Tämä tarkoittaa, että optimituotto on mahdollista saavuttaa joillain lähtöarvoilla usealla eri tavalla. Näissä tapauksissa ratkaisu \mathbf{x} voi olla riippuvainen kappaleiden järjestyksestä algoritmille annetuissa paino- ja hintavektorissa. Tämä mahdollisuus on otettava huomioon simulaation tuloksia tulkitessa.

3.2 Tuotteiden yksikköhinnat

Optimointitehtävän 1 esittämä tavoitefunktio sisältää yksikköhinnan c_i , joka kuvaa tässä tapauksessa eri levyisten puutavaratuotteiden i hintaa. Tässä työssä tarkastellaan kolmea erilaista yksikköhintaa; tuotteen markkinahintaa, tuotteen tilavuutta, johon mallin oletusten perusteella vaikuttaa vain tuotteen leveys ($c_i = w_i$), sekä tuotteen dynaamista yksikköhintaa. Tuotteen dynaamisella yksikköhinnalla tarkoitetaan hintaa, joka ottaa huomioon tilauskannan kysynnän ja jo valmistetun tavaran määrän. Tällöin yksikköhinta c_i voidaan muotoilla kaavan 5 mukaisesti:

$$c_i = \max \left\{ 0, \text{markkinahinta}_i \cdot \left(1 - \frac{\text{tuotettu}_i \text{ kpl}}{\text{kysyntä}_i \text{ kpl}} \right) \right\}. \quad (5)$$

Tällöin tilauskannan kysynnän täytyessä jonkin tuotteen kohdalla kyseisen leveyden tavaran yksikköhinta on nolla. Dynaaminen yksikköhinta päivitetään tässä työssä jokaisen tukin sahaamisen jälkeen.

Jos jonkin tuotteen osalta suhde c_i/a_i on muiden tuotteiden vastaavaa suhdetta selvästi suurempi, menetelmä suosii kyseistä tuotetta kahdessa ensimmäisessä vertailutapauksessa. Jotta simulaatio ei tuottaisi vain tätä tuotetta, ja jotta myös muiden tuotteiden kysynät kyetään täyttämään, tuotteen markkinahinnasta tai tilavuudesta muodostuva yksikköhinta asetetaan nolaksi, kun tuotteen kysyntä on täyttynyt. Näin voidaan taata simulaation pysähtyvän. Käytännön tapauksessa tämä estää ylivarastoinnin.

3.3 Simulaatio

Simulaation aluksi määrittellään kunkin tuotteen kysyntä ja yksikköhinta. Jo tuotetun puutavaran määrä alustetaan nolaksi. Simulaation yksi iteraatio kulkee seuraavasti; otetaan sahaukseen tukki, joka on suora ympyrälieriö. Tukin säde r on tasajakautunut satunnaismuuttuja, ja tasajakauman parametrit tunnetaan. Tukki halkaistaan läpisaauksilla N :ksi lankuksi. Sahaus mitoitetaan siten, että yksi sahausista läpäisee ympyrän keskipisteen. Lankkujen lukumäärälle pätee mitoituksesta johtuen $N = 2 \cdot \lfloor r/\text{lankun paksuus} \rfloor$. Seuraavaksi jokaisesta muodostuneesta lankusta poistetaan kaarevat reunat eli se *särmätään*. Tämä toteutetaan siten, että

muodostuneen särmätyn lankun leveys on suurin mahdollinen kokonaisluku millimetreissä. Särmäämisen jälkeen lankku sahataan algoritmin 1 mukaisesti siten, että tuotto maksimoituu. Työssä tarkastellaan vain särmättyä puutavaraa. Iteraation lopuksi päivitetään tuotettujen puutuotteiden määrä. Sahattujen tukkien laskuri kasvaa yhdellä. Simulaation iteraatioita toistetaan, kunnes tuotetut määrät täyttävät jokaisen puutuotteen kysynnän. Algoritmi 2 esittää simulaation periaatteen.

Algoritmi 2 Simulaatio

Anna eri puutavaratuotteiden joukko I sekä näiden leveydet a_i
 Alusta jokaisen tuotteen yksikköhinta c_i
 Alusta jokaisen tuotteen kysyntä d_i
 Alusta jokaisen tuotteen tuotettu määrä p_i , alussa $p_i = 0 \forall i \in I$
 Alusta käytettyjen tukkien määrä $L = 0$
while $\exists i : d_i \geq p_i$ **do**
 Sahataan r -säteinen tukki N lankuksi
 for Jokaiselle lankulle $n = 1, \dots, N$: **do**
 if Lankun leveys $w_n > \min a_i, i = 1, \dots, m$ **then**
 Sahataan lankku pienemmiksi kappaleiksi (alg. 1)
 end if
 end for
 $L = L + 1$
 Päivitetään $p_i \forall i \in I$
 Jos käytössä on dynaaminen yksikköhinta, päivitetään $c_i \forall i \in I$
 Asetetaan $c_i = 0 \forall i : p_i \geq d_i$
end while

Simulaatiosta tallennetaan jokaisen iteraation, eli tukkipuun, kohdalla sahattujen tuotteiden lukumäärät sekä tukkipuun säde. Tästä voidaan laskea hyötyaste eli yksittäisestä tukista sahattujen tuotteiden yhteenlasketun poikkipinta-alan suhde tukin poikkipinta-alaan. Tältä pohjalta voidaan myös tarkastella kuinka eri tuotteiden kysynät täyttyvät sahattujen tukkipuiden funktiona.

4 Tulokset

4.1 Simulaatioasetukset

Simulaation vakiolähtöarvoihin kuuluvat tarkasteltavien tuotteiden markkinahinnat, näiden mitat, lankun vakiopakisuus, simulaation toistokerrat ja tukin sädettä kuvaavan satunnaismuuttujan jakauman parametrit. Muutettavina tietoina ovat optimointitavoite sekä tarkasteltavat kysynät. Optimointitavoitteella tarkoitetaan tässä sitä, vastaako tuotteen yksikköhinta markkinahintaa, tuotteen leveyttä, vai dynaamista yksikköhintaa.

Tuotteiden markkinahinnat ja mitat on esitelty taulukossa 1. Mitat vastaavat lähestulkoon oikeita myytäviä tuotteita. Esimerkiksi tuotteen 4 hinta vastaa tuotteen

hintaa, jonka mitat ovat 50 mm X 125 mm. Muokkaukset mittoihin johtuvat malliteknisistä syistä. Tukin säde r on tasajakautunut satunnaismuuttuja parametreilla [150, 300] (mm). Tukista sahattavien lankkujen vakiopaksuus on 48 mm. Simulaatio toistetaan 1000 kertaa kuudelle eri optimointitavoitteen ja tilauskirjan yhdistelmälle.

Eri kysynät, eli *tilauskirjat*, joita työssä vertaillaan, on esitetty taulukossa 2. Ensimmäisessä tilauskirjassa tuotteen kysyntä kasvaa tuotteen poikkipinta-alan pienentyessä, toisessa tuotteen kysyntä kasvaa tuotteen poikkipinta-alan kasvaessa.

Taulukko 1: Eri tuotteiden markkinahinnat ja mitat, jotka vastaavat likipitäen työn tekohetkellä voimassa olevia myymälähintoja sekä mittoja (Kesko, 2024).

	Tuote 1	Tuote 2	Tuote 3	Tuote 4	Tuote 5
Mitat (mm X mm)	21X48	48X48	48X73	48X125	48X150
Markkinahinta (€/m)	0.65	1.25	1.89	3.25	3.95
Hinta / leveys	0.03095	0.02604	0.02589	0.02600	0.02633

Taulukko 2: Vertailtavat tilauskirjat.

Mitat (mm X mm)	Tilauskirja 1	Tilauskirja 2
21X48	500	125
48X48	370	270
48X73	320	350
48X125	270	410
48X150	225	500

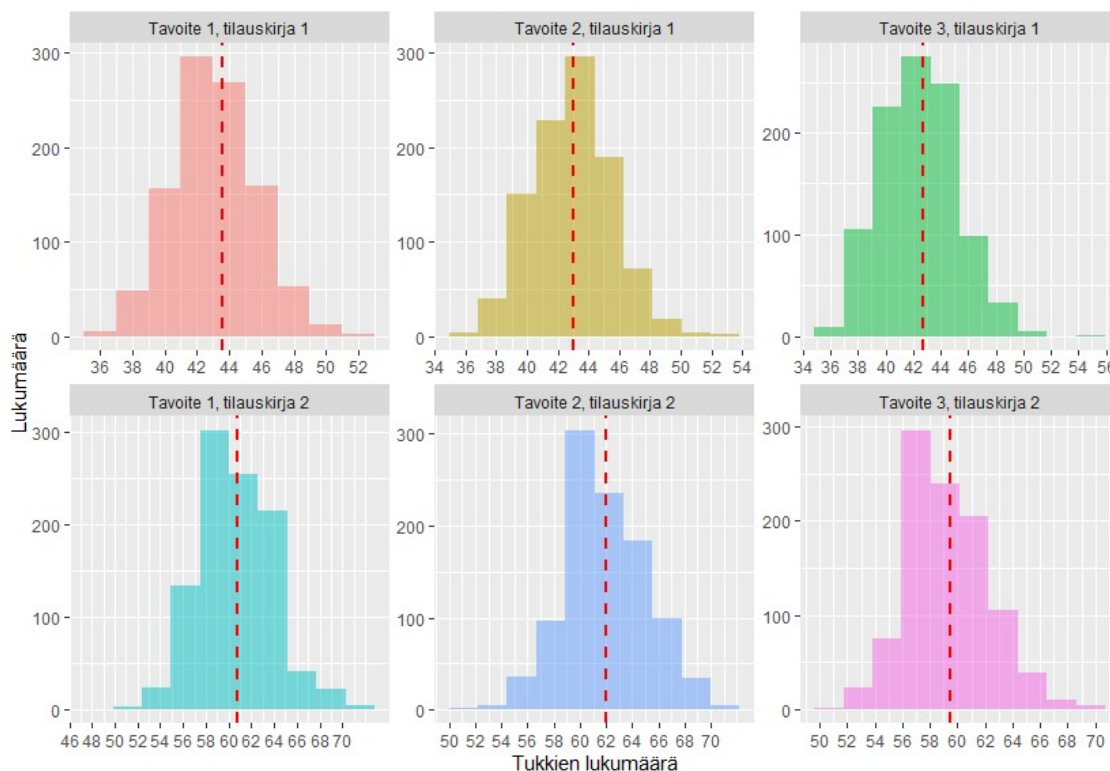
4.2 Optimointitavoitteet

Kuudesta eri simulaatiosta raportoidaan tuloksina sahattujen tukkien lukumäärän keskiarvo, keskihajonta, sekä jakauma. Lisäksi raportoidaan tukkien hyötyaste, sekä keskimääräinen tuotanto sahattujen tukkien lukumäärän funktiona.

Keskiarvot ja keskihajonnat ovat taulukossa 3. Tukkien lukumäärän jakauma eri simulaation toistokerroilla on visualisoitu kuvassa 3. Sekä kuvassa että taulukossa käytetty sana *tavoite* vastaa edellämainittuja optimointitavoitteita: tavoite 1 tarkoittaa yksikköhintojen vastaavan markkinahintoja, tavoite 2 yksikköhintojen vastaavan tuotteen leveyttä, ja tavoite 3 tarkoittaa yksikköhintojen vastaavan dynaamista yksikköhintaa.

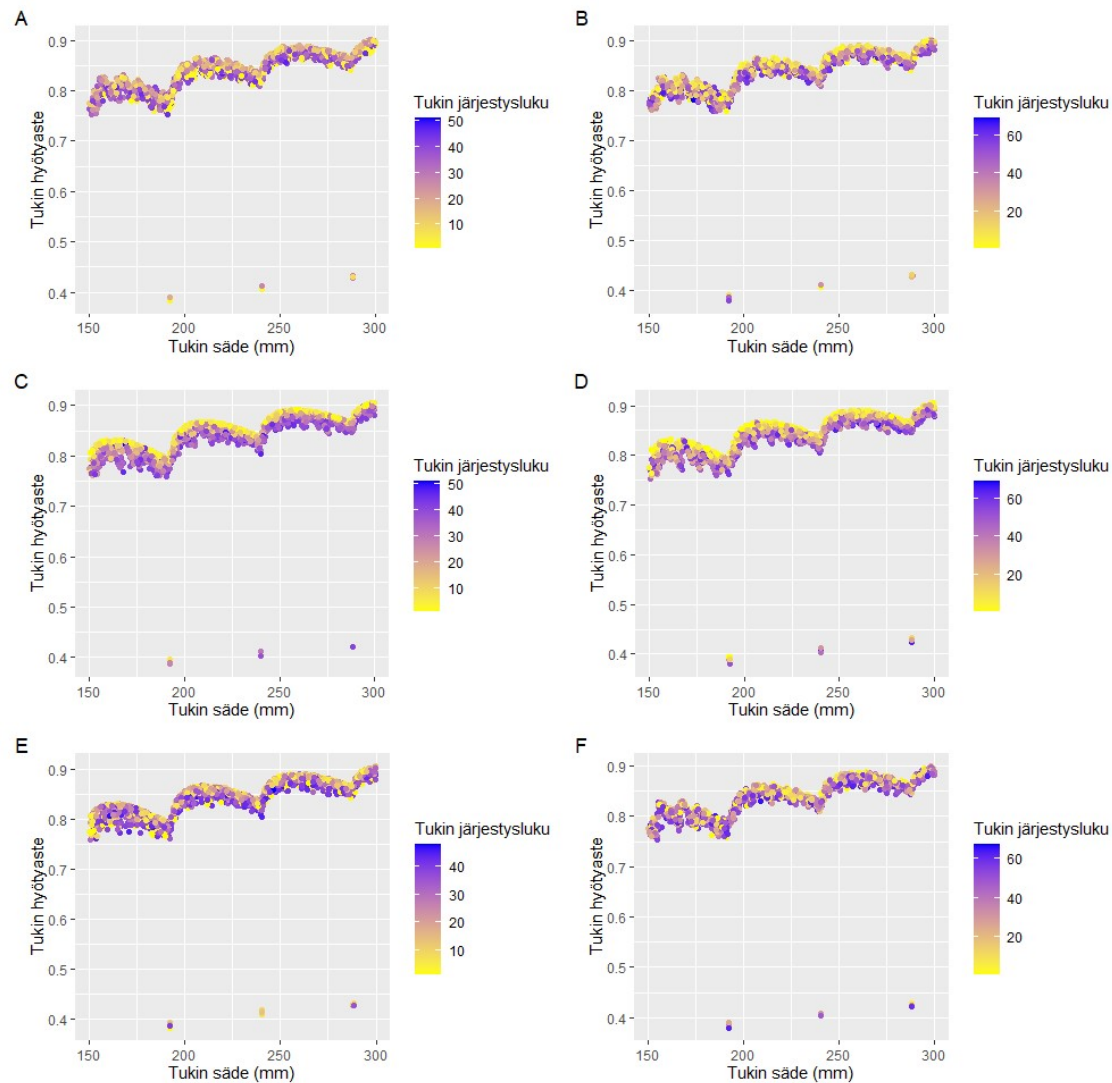
Taulukko 3: Sahattujen tukkien lukumäärän keskiarvot ja keskihajonnat.

	Tavoite 1, tilauskirja 1	Tavoite 2, tilauskirja 1	Tavoite 3, tilauskirja 1	Tavoite 1, tilauskirja 2	Tavoite 2, tilauskirja 2	Tavoite 3, tilauskirja 2
Keskiarvo	43.584	42.998	42.7	60.721	62.007	59.425
Keskihajonta	2.601	2.710	2.677	3.288	3.2067	3.144



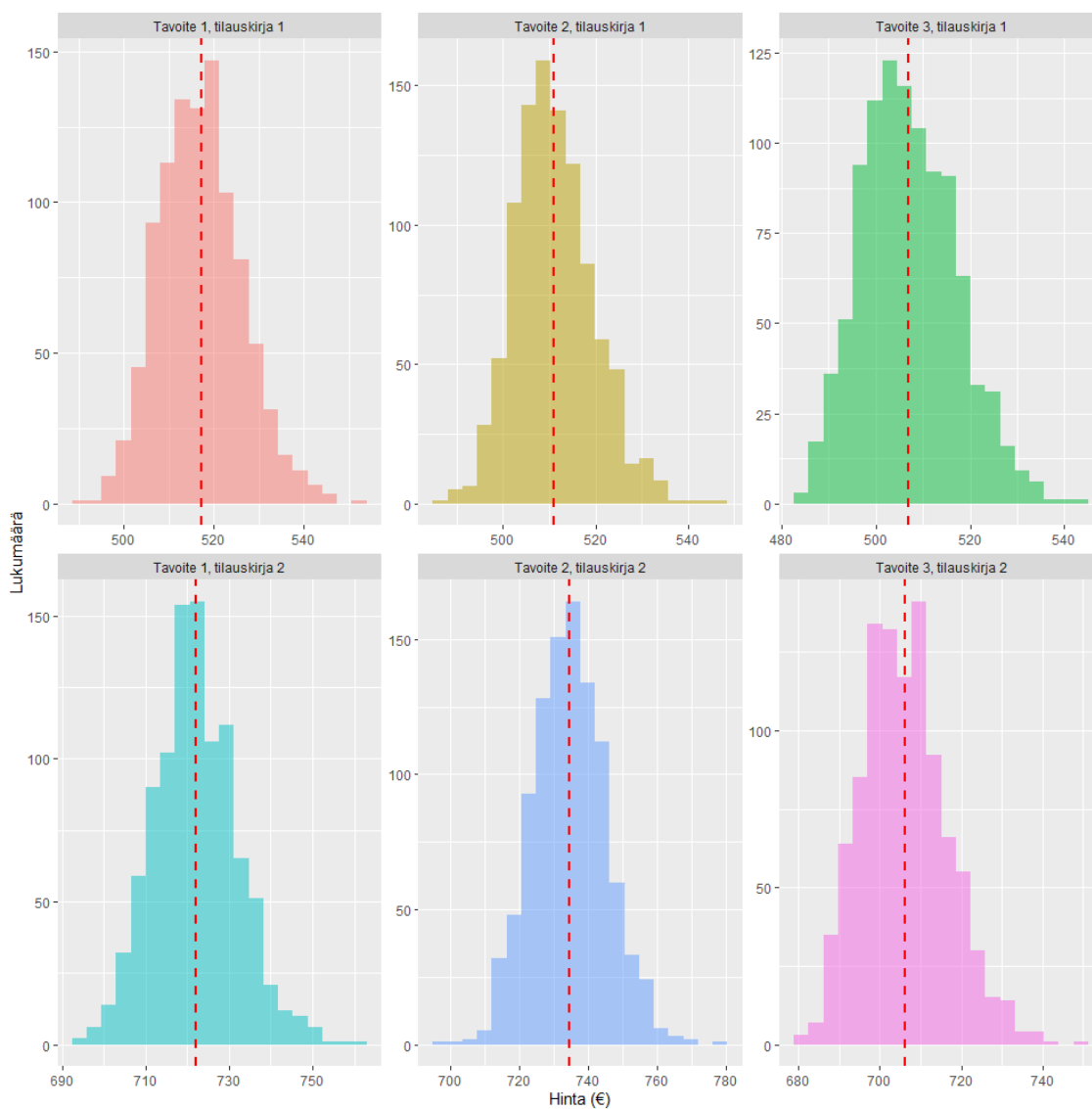
Kuva 3: Tukkien lukumäärien jakaumat simulaatiossa eri tavoitteilla ja tilauskirjoilla. Sahattujen tukkien lukumäärän keskiarvo on merkitty punaisella katkoviivalla.

Kuvassa 4 esitetään *hyötyaste* tukin säteen ja järjestysluvun funktiona. Tukin hyötyasteella tarkoitetaan yksittäisestä tukista sahattujen tuotteiden yhteenlasketun poikkipinta-alan suhdetta tukin poikkipinta-alaan. Tukin järjestysluvulla tarkoitetaan tukin sijoitusta sahausjärjestyksessä. Hyötyaste laskettiin jokaiselle tukille jokaisella simulaation toistokerralla, jokaisella eri lähtöarvon simulaatiolla. Alkuperäisiä aineistoja oli siis yhteensä kuusi kappaletta, kuten simulaatioitakin. Näiden aineistojen koko määräytyi simulaation toistokertojen (1000 kpl) ja kullakin toistokerralla sahattujen tukkien lukumäärällä. Visualisaatiossa on käytetty yksinkertaista satunnaisotantaa alkuperäisistä aineistoista selkeyden vuoksi. Kunkin satunnaisotoksen koko on 3000 datapistettä, eli hieman alle kymmenesosa alkuperäisestä aineistosta. Satunnaisotokset toteutettiin R:n *sample*-funktioilla.



Kuva 4: Tukin hyötyaste tukin säteen ja järjestysluvun funktiona.

Jokaisesta simulaatiosta tarkastellaan myös käytetyn raaka-aineen kustannuksia. Tukkipuun hintana käytetään työn tehoketkellä voimassa olevaa mäntytukin kuutiohintaa $72,46 \text{ €/m}^3$ (UPM, 2024). Taulukossa 4 esitetään keskimääräiset raaka-ainekustannukset ja niiden keskihajonnat eri simulaatioissa. Kustannusten jakauma kussakin simulaatiossa eri toistokertojen välillä on visualisoitu kuvassa 5. Kustannuksia voidaan verrata sahatun puutavaran markkinahintaan. Jos ylituotetuille tuotteille ei lasketa arvoa, saadaan tilauskirjan 1 markkina-arvoksi $3158,55\text{€}$, ja tilauskirjan 2 markkina-arvoksi $4387,75\text{€}$. Taulukko 4 esittää markkinahinnan ja kustannuksen suhteen.



Kuva 5: Raaka-ainekustannusten jakauma eri simulaatioissa.

Taulukko 4: Raaka-ainekustannukset eri tavoitteilla ja tilauskirjoilla. Lisäksi esitetty tuotteista saatavan markkinahinnan sekä keskimääräisen raaka-ainekustannusten suhde.

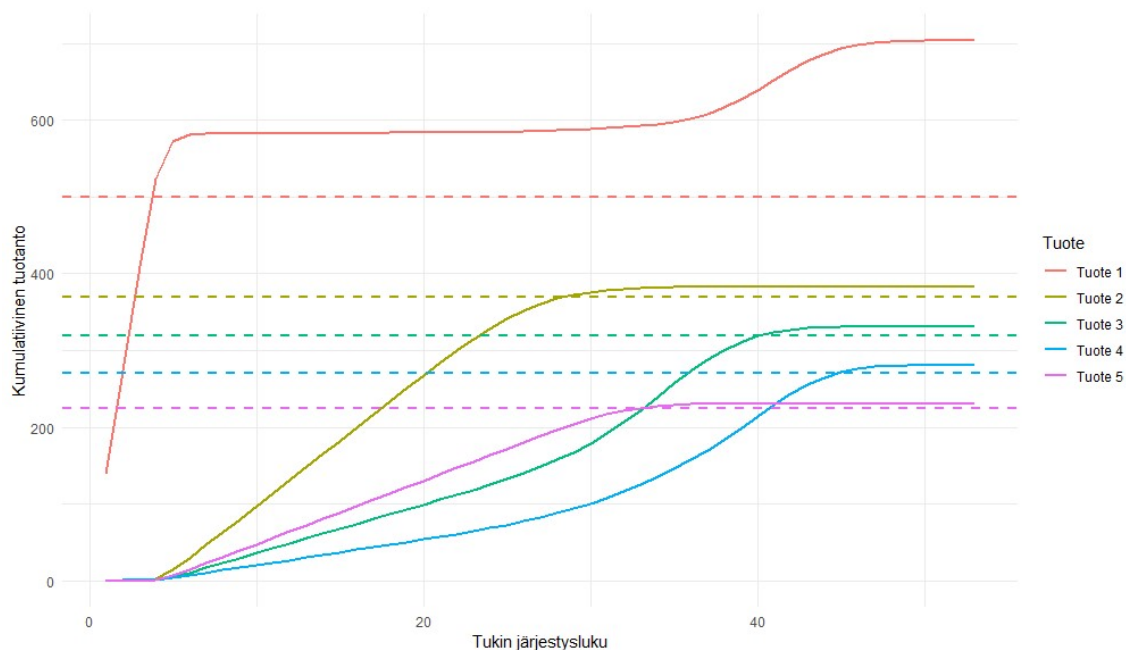
	Tavoite 1, tilauskirja 1	Tavoite 2, tilauskirja 1	Tavoite 3, tilauskirja 1	Tavoite 1, tilauskirja 2	Tavoite 2, tilauskirja 2	Tavoite 3, tilauskirja 2
Keskiarvo (€)	517.14	511.07	506.00	721.00	734.62	706.13
Keskihajonta (€)	9.06	8.44	9.93	10.01	10.63	10.50
Suhde	6.108	6.180	6.230	6.077	5.973	6.214

Lisäksi jokaisesta simulaatiosta raportoidaan keskimääräinen kumulatiivinen

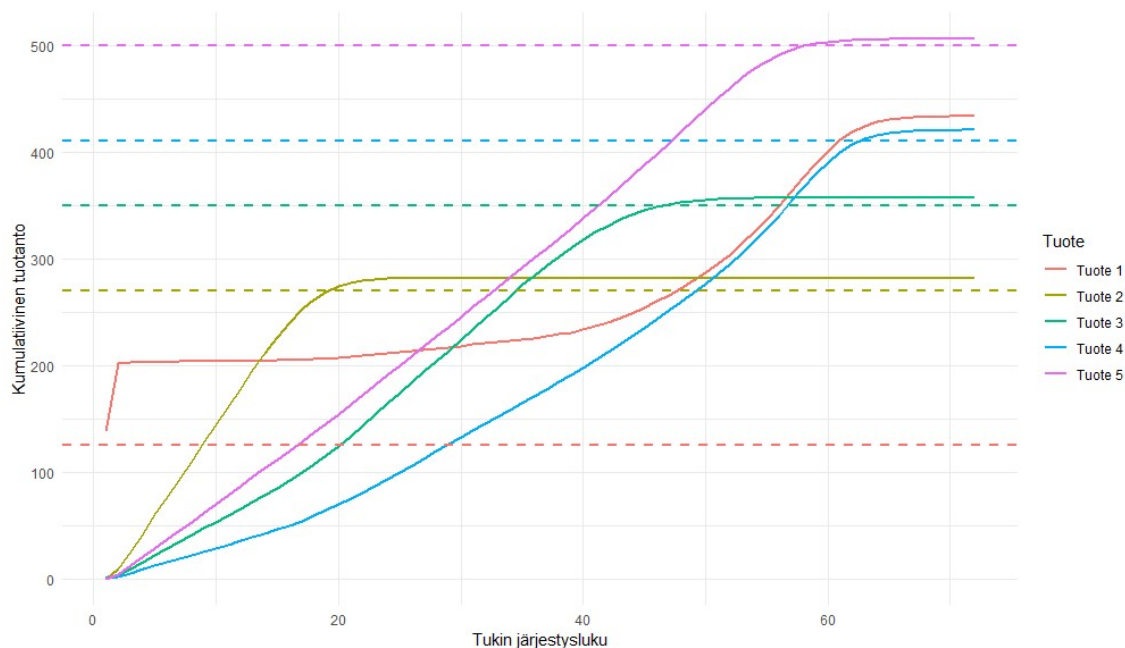
tuotanto kuvissa 6-11. Esimerkiksi kuva 6 esittää keskimääräisen tuotannon simulaatiolle, jossa yksikköhinnat vastaavat markkinahintoja ja kysyntänä on tilauskirja 1. Keskimääräinen tuotanto tarkoittaa tässä yhteydessä sitä, kuinka paljon tuotetta i on kumulatiivisesti valmistettu keskimäärin järjestysluvun j tukista. Keskiarvo lasketaan siis eri simulaatiotoistojen kumulatiivisista tuloksista. Lisäksi kuvassa kysynnät on esitettyinä katkoviivalla. Tuloksia tulkitaan lisää eri tavoitteita käsittelevissä alaluvuissa 4.3, 4.4 ja 4.5.

4.3 Markkinahintaperustaiset tulokset

Kuva 6 esittää keskimääräisen tuotannon simulaatiossa, jossa tuotteiden yksikköhinnat vastaavat tuotteiden markkinahintaa, ja kysyntä vastaa tilauskirjaa 1. Kuvassa 7 yksikköhinnat ovat samat, mutta kysyntä vastaa tilauskirjaa 2. Molemmista kuvaajissa ensimmäiset tukit sahataan ainoastaan tuotteen 1 mittaisiksi. Ylituotantoa syntyy jo ensimmäisillä tukeilla, sillä tuotteen yksikköhinta päivitetään nolnaan vasta koko tukin sauhuksen jälkeen. Tuotteiden valmistusjärjestystä voidaan selittää niiden hinnan ja leveyden suhteella. Taulukko 1 esittää kullekin tuotteelle kyseisen suhteen. Ensimmäisen tuotteen kohdalla suhde on muita merkittävästi suurempi. Tämä selittää osaltaan tuotteen 1 kysynnän nopean täyttymisen molemman tilauskirjan tapauksessa. Muiden tuotteiden hinnan ja leveyden suhteet ovat lähellä toisiaan, mikä vuoksi näiden tuotteiden kohdalla kysynnän täyttymisjärjestystä ei voi päätellä tästä suureesta.



Kuva 6: Keskimääräinen kumulatiivinen tuotanto, kun tuotteiden yksikköhinnat vastaavat markkinahintoja ja tuotteiden katkoviivojen mukaiset kysynät tilauskirjaa 1.



Kuva 7: Keskimääräinen kumulatiivinen tuotanto, kun tuotteiden yksikköhinnat vastaavat markkinahintoja ja tuotteiden katkoviivojen mukaiset kysynät tilauskirjaa 2.

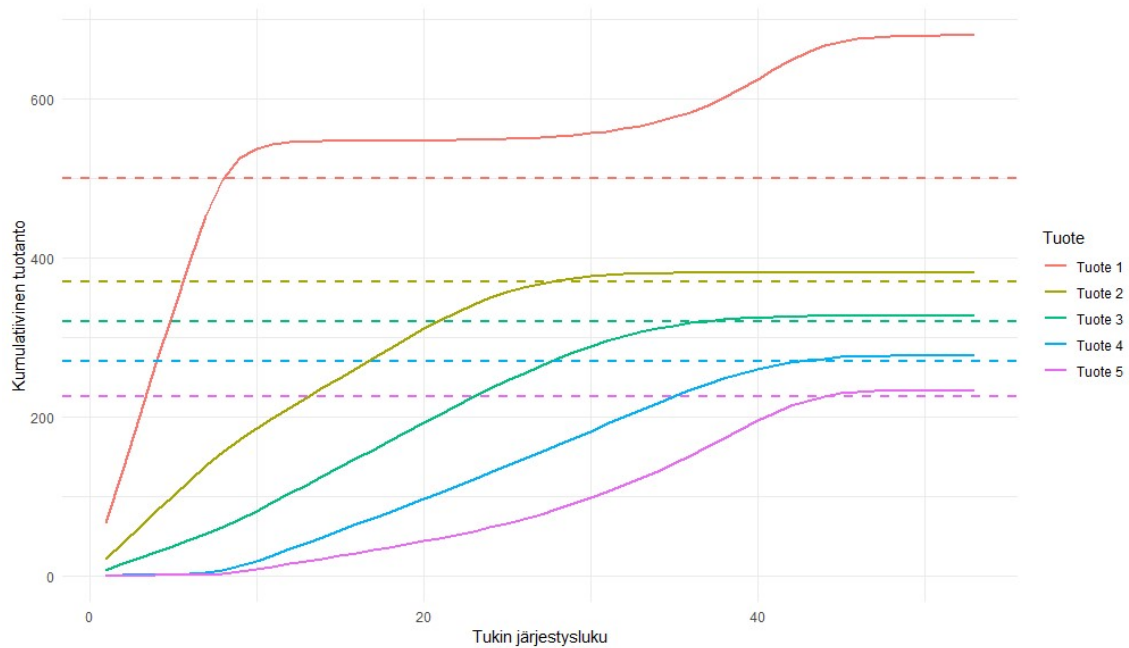
Molemmissa keskimääräistä tuotantoa visualisoivissa kuvissa, ja lisäksi myös alalukujen 4.4 ja 4.5 vastaavissa kuvissa 8-11, voidaan havaita, että tuotetta 1 valmistuu vielä sen kysynnän täyttymisen jälkeen. Tätä tapahtuu, kun jäljellä on enää vain yksi tai muutama tuote, jonka kysyntä ei ole täyttynyt. Selitys tälle löytyy algoritmista 1. Vaikka tuotteen yksikköhinta on tässä vaiheessa nolla, tuotteen valmistaminen ei vaikuta lankusta saatavaan optimituottoon, jos siihen käytettyä materiaalia ei voi hyödyntää positiivisen yksikköhinnan tuotteisiin. Tätä väitettä tukee kuva 9, missä vain leveimpien tuotteiden kysyntä on täyttämättä, ja tuotteen 1 ylituotannon tällöin ollessa kaikkein rajuinta. Lankusta jää todennäköisesti paljon hävikkiä leveän tuotteen sahaamisen jälkeen, ja optimituotto onkin sama vaikka hävikkiin menevästä materiaalista sahataan tuotetta 1. Syy juuri tuotteen 1 ylituotannolle lienee sen kapeus sekä indeksi i , katso alaluku 3.1.

Kuvassa 4 kuvaajat A ja B esittävät sahattujen tukkien hyötyastetta nyt tarkasteltavalla tavoitteella. Kuvaaja A esittää tilauskirjan 1 tapausta, kuvaaja B tilauskirjan 2 tapausta. Molemmat kuvaajat ovat hyvin samankaltaisia. Tukin säteellä vaikuttaa olevan samanlainen vaikutus hyötyasteeseen molemmissa tapauksissa. Kummallakaan kysynnällä ei ole havaittavissa myöskään kovin selkeää trendiä tukin järjestysluvun ja hyötyasteen välillä.

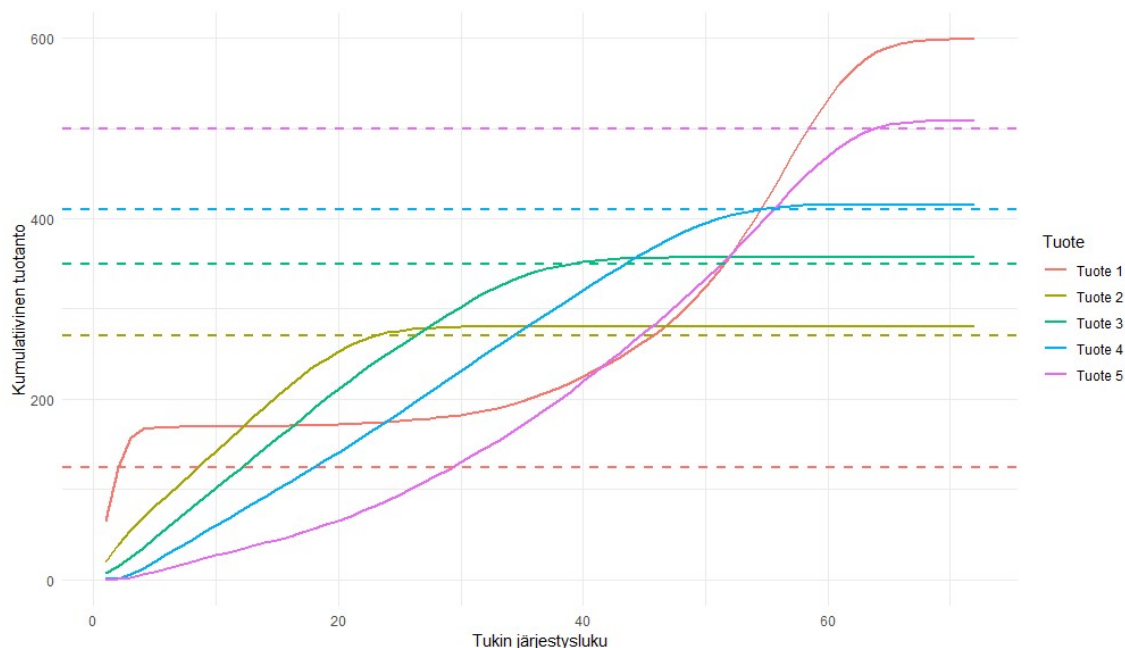
4.4 Leveysperustaiset tulokset

Kuva 8 esittää keskimääräisen tuotannon, kun yksikköhinnat vastaavat tuotteiden leveyksiä ja kysyntä tilauskirjaa 1. Kuvassa 9 yksikköhinnat ovat samat, mutta kysyntä

vastaa tilauskirjaa 2. Molemmista kuvista havaitaan, että ensimmäiseksi valmistuu kapeimmat tuotteet. Syy tälle on se, että tavoitteena on nyt käytännössä minimoida hävikki. Hävikki on helpoin minimoida, kun lankku jaetaan mahdollisimman pieniin tuotteisiin. Tämän takia algoritmi suosii aluksi kapeampia tuotteita.



Kuva 8: Keskimääräinen kumulatiivinen tuotanto, kun tuotteiden yksikköhinnat vastaavat tuotteiden leveyksiä ja tuotteiden katkoviivojen mukaiset kysynät tilauskirjaa 1.



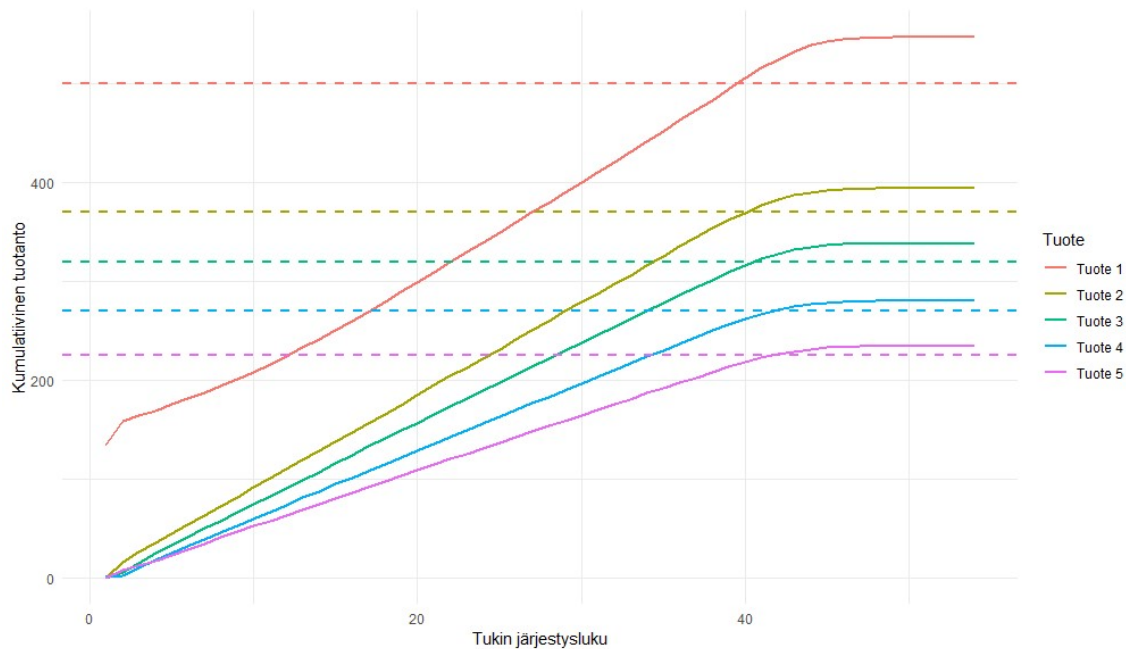
Kuva 9: Keskimääräinen kumulatiivinen tuotanto, kun tuotteiden yksikköhinnat vastaavat tuotteiden leveyksiä ja tuotteiden katkoviivojen mukaiset kysynät tilauskirjaa 2.

Kuvassa 4 kuvaajat C ja D esittävät sahattujen tukkien hyötyastetta, kun simulaatiossa yksikköhinnat vastaavat leveyttä. Kuvaaja C esittää tilauskirjan 1 tapausta, kuvaaja D tilauskirjan 2 tapausta. Hyötyaste tukin säteen funktiona on hyvin samankaltainen kuin tavoitteen 1 kohdalla. Nyt on kuitenkin havaittavissa selkeämpi trendi hyötyasteen ja tukin järjestysluvun välillä, kun säde pysyy vakiona. Tukin hyötyaste on usein korkeampi, kun järjestysluku on pienempi. Syy tälle on sama kuin edellä; alussa kapeimmilla tuotteilla on helpoin minimoida hävikki. Kun kapeimpien tuotteiden kysyntä täyttyy ja niiden yksikköhinta asetetaan nolnaan, algoritmin mukaan lankut tulisi sahata leveämmiksi tuotteiksi, jolloin hävikin minimointi on vaikeampaa.

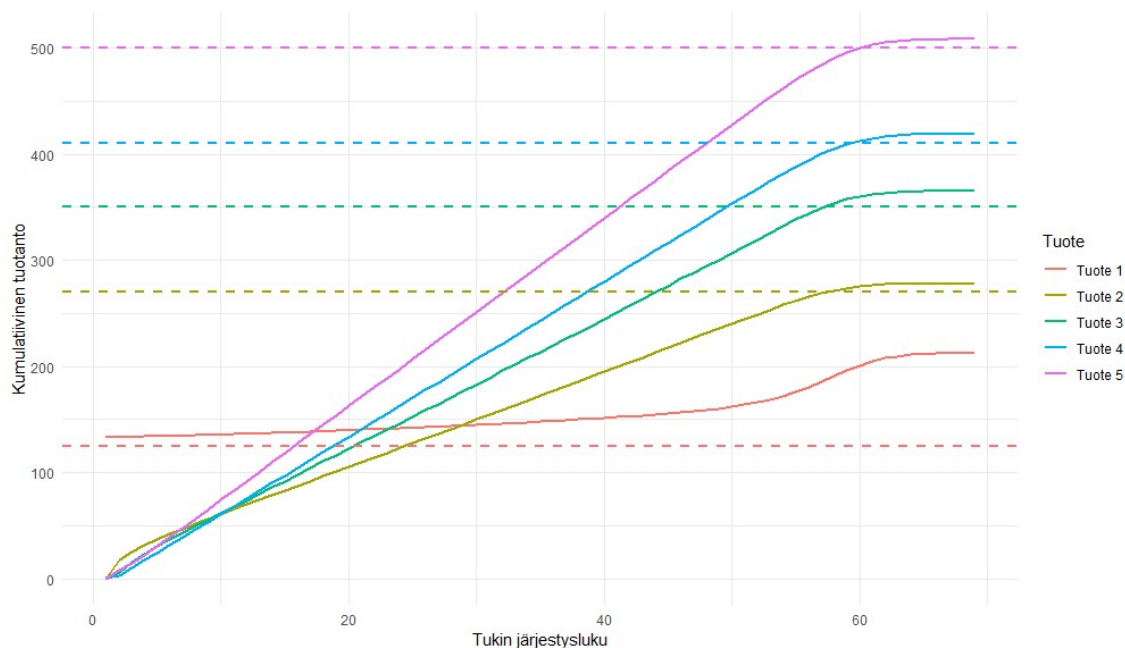
4.5 Dynaamiseen hintaan perustuvat tulokset

Kuva 10 esittää keskimääräisen tuotannon simulaatiossa, jossa tuotteiden yksikköhinnat vastaavat tuotteiden dynaamista hintaa, ja kysyntä vastaa tilauskirjaa 1. Kuvassa 11 yksikköhinnat ovat samat, mutta kysyntä vastaa tilauskirjaa 2. Nyt tuotanto on tasaisempaa verrattuna edellisiin tavoitteisiin. Kysynät täyttyivät keskimäärin samaan aikaan. Sen vuoksi myöskään minkään tuotteen ylituotantoa ei synny merkittävässä määrin. Ensimmäisestä tukista sahataan jälleen yksinomaan tuotetta 1 sen suurimman hinta-leveys-suhteensa vuoksi. Tämä kuitenkin tasoittuu nopeasti, kun yksikköhinta päivittyy seuraavalla iteraatiolla. Tasainen tuotanto selittäneeekin taulukoissa 3 ja 4 esitettyjä tuloksia. Molempien tilauskirjojen kohdalla

tavoitteella 3 saavutetaan keskimäärin pienin sahattujen tukkien lukumäärä sekä raaka-ainekustannukset.



Kuva 10: Keskimääräinen kumulatiivinen tuotanto, kun tuotteiden yksikköhinnat vastaavat tuotteiden dynaamisia yksikköhintoja ja tuotteiden katkoviivojen mukaiset kysynät tilauskirjaa 1.



Kuva 11: Keskimääräinen kumulatiivinen tuotanto, kun tuotteiden yksikköhinnat vastaavat tuotteiden dynaamisia yksikköhintoja ja tuotteiden katkoviivojen mukaiset kysynät tilauskirjaa 2.

Kuvassa 4 kuvaajat E ja F esittävät sahattujen tukkien hyötyastetta dynaamisten yksikköhintojen tapauksessa. Kuvaaja E esittää tilauskirjan 1 tapausta ja kuvaaja F tilauskirjan 2 tapausta. Hyötyasteen ja tukin säteen välillä on jälleen samanlainen yhteys kuin edeltävissä tapauksissa. On kuitenkin vaikea huomata minkäänlaista yhteyttä hyötyasteen ja tukin järjestysluvun välillä, kun säde pysyy vakiona. Syy lienee tasainen tuotanto, ja se, että valmistamalla kapeita tuotteita saavutetaan suurempi hyötyaste. Päinvastoin kuin edellisten tavoitteiden tapauksessa, kapeampien tuotteiden kysyntä täyttyy lähes yhtä aikaa muiden tuotteiden kanssa. Tämä tarkoittaa, että jokaisen järjestysluvun tukista voidaan sahata myös kapeampia tuotteita. Toisaalta minkään järjestysluvun tukin kohdalla ei valmisteta yksinomaan kapeita tuotteita (poislukien ensimmäinen tukki). Tämän vuoksi tukin hyötyasteella ja järjestysluvulla ei ole merkittävää yhteyttä.

5 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin puutavaran valmistuksen optimointia rakentamalla yksinkertaistettu malli, joka antaa optimaalisen sahaustavan annetulle raaka-aineelle. Työn tutkimuskysymys oli selvittää, miten erilaiset yksikköhinnat eri puutavara tuotteille vaikuttavat materiaalikulutukseen, kun tarkastellaan eri kysynnän tapauksia. Kysymystä selvitettiin simulaatiolla. Simulaatiossa satunnaisten kokoisia tukkeja sahattiin mallin antamalla tavalla tuotteiksi, kunnes kunkin tuotteen kysyntä täyttyi. Simulaation tuloksista vertailtiin eri yksikköhintojen ja kysyntöjen välillä sahattujen

tukkien lukumäärää, raaka-ainekustannuksia, syntyvän varaston tasapainoisuutta, sekä raaka-aineen hyötyastetta.

Tuotteen dynaamisella yksikköhinnalla tarkoitettiin päivittyvää yksikköhintaa, joka huomioi tuotteiden tuotannon ja kysynnän. Tuloksina havaittiin, että tuotteiden dynaaminen yksikköhinta takasi pienimmät sahattujen tukkien lukumäärät ja raaka-ainekustannukset kummallakin kysyntätasolla. Ero muihin yksikköhintoihin oli suurin, kun leveämpien tuotteiden kysyntä oli suurempi. Markkinahinnoittelu tuotti paremman tuloksen kuin tilavuuteen perustuva hinnoittelu, kun leveämmillä tuotteilla oli suurempi kysyntä. Tulos oli kuitenkin päinvastainen, kun kysynät olivat suuremmat kapeammilla tuotteilla.

Tukkien hyötyaste säteen funktiona oli hyvin samankaltainen jokaisella yksikköhinnalla ja kysynnällä. Jokaisessa tapauksessa datapisteet (tukin säde, tukin hyötyaste) muodostivat nousevan aaltomaisen trendin. Tukkien hyötyasteen ja tukin järjestysluvun välinen yhteys oli merkittävin tilavuuteen perustuvassa yksikköhinnassa. Kun tukin säde vakioitiin, pienemmän järjestysluvun tukkien havaittiin saavuttavan suuremman hyötyasteen sahauskassa. Syynä tälle oli se, että kyseisen yksikköhinnan sahauskassa ensin valmistetaan kapeammat tuotteet, joilla hävikki on helpompi minimoida. Markkinahintaan pohjautuvilla yksikköhinnoilla tai dynaamisilla yksikköhinnoilla tukin hyötyasteen ja järjestysluvun välinen yhteys ei vaikuttanut niin merkittävältä.

Tuotannon sujuvuutta, eli varaston tasapainoisuutta, vertailtiin keskiarvoistamalla eri simulaatioitoiden väliset kumulatiiviset tuotteiden tuotantolukumäärät. Yksikköhinnoilla, jotka vastaavat markkinahintoja, malli suosi tuotteita, joiden hinnan ja leveyden suhde oli suurin. Leveyteen perustuvilla yksikköhinnoilla tuotteiden kysynät täyttyivät kasvavassa leveysjärjestyksessä. Dynaamisilla yksikköhinnoilla tuotteiden tavoitteet täyttyivät keskimäärin samaan aikaan, kun taas kahdella muulla yksikköhinnalla eri tuotteiden välillä oli suuria eroja. Millään yksikköhinnalla ei välttytty ylituotannolta. Erityisesti kapeinta tuotetta syntyi monessa tapauksessa paljon kysyntää enemmän.

Tulokset materiaalikulutuksen ja tuotannon sujuvuuden suhteen olivat hyvin samankaltaiset kuin alaluvussa 2.2 esitellyssä Todorokin ja Rönngvistin (2002) tutkimuksessa. Myös heidän työssään tuotteiden päivittyvä hinnoittelu, joka ottaa huomioon kysynnän ja valmistuneen tuotannon, takasi pienimmän materiaalikulutuksen, sekä tuotteiden kysynnän yhtäaikaisen täyttymisen.

Tulosten yleispätevyyttä rajaa moni tekijä. Työssä tukit käsiteltiin ympyrälieriönä, mikä on karkea yksinkertaistus raaka-aineen todellisesta tyypillisestä geometriasta. Tukin säteen oletaminen tasajakautuneeksi ei ole realistista. Ongelmaa tarkasteltiin yksiulotteisena ongelmana, ja tämän vuoksi mallin tuotevalikoima oli rajattu samankaksuisiin tuotteisiin. Tuotteet olivat myös täyssärmäisiä, eikä muita laatusiekoja tarkasteltu. Vertailtujen tilauskirjojen tuotteiden kysyntöjen suhde tuskin vastaa reaali maailman kysyntöjä. Työssä ei myöskään huomioitu terän aiheuttamaa hukkaa.

Jatkokysymyksiin voidaan vastata muokkaamalla mallin oletuksia. Esimerkiksi, jos saatavilla olevien tukkien määrät ja mitat tunnetaan, voitaisiin vertailla, miten tukkien lajittelu suuruusjärjestykseen ennen sahausta vaikuttaa tuotantoon. Myöskin erilaisia tukin läpisahaustapoja voitaisiin tarkastella. Tässä työssä läpisahaustukset

mitoitettiin siten, että lankkuja syntyi parillinen määrä. Sahaus voitaisiin kuitenkin tehdä niin, että keskimmäisen lankun keskikohta kulkee tukin keskipisteen kautta. Tällä voisi olla vaikutusta tukin hyötyasteeseen. Lisäksi dynaamisille yksikköhinnoille voisi tehdä herkkyyksanalyysiä tarkastelemalla, miten lähtöarvot vaikuttavat tuotantoon. Tässä työssä tuotteen yksikköhinnat asetettiin nolaksi kysynnän täytyessä. Tämä ei kuitenkaan estänyt ylituotantoa, minkä vuoksi voitaisiin harkita varastoinnin kustannusten lisäämistä malliin.

Viitteet

- J. Geerts. Mathematical Solution for Optimising the Sawing Pattern of a Log Given Its Dimensions and Its Defect Core. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 14(1):124–134, 1984. URL https://www.scionresearch.com/__data/assets/pdf_file/0003/59700/NZJFS1411984GEERTS124_134.pdf.
- L. V. Kantorovich. Mathematical Methods of Organizing and Planning Production. *Management Science*, 6(4):366–422, 1960. ISSN 0025-1909. doi: 10.1287/mnsc.6.4.366. URL <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/mnsc.6.4.366>.
- H. Kellerer, U. Pferschy, ja D. Pisinger. *Knapsack Problems*. Springer Berlin, Heidelberg, 2004. ISBN 9783540402862. doi: 10.1007/978-3-540-24777-7. URL <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-24777-7>.
- Kesko. K-rauta puutavara, 2024. <https://www.k-rauta.fi/kategoria/puutavara/sahatavara> [Avattu: 28.2.2024].
- G. Scheithauer. *Introduction to Cutting and Packing Optimization*. International Series in Operations Research & Management Science. Springer International Publishing, volume 263, 2018. ISBN 9783319644028 9783319644035. doi: 10.1007/978-3-319-64403-5. URL <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-64403-5>.
- C. Todoroki ja M. Rönnqvist. Dynamic Control of Timber Production at a Sawmill with Log Sawing Optimization. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 17(1): 79–89, 2002. ISSN 0282-7581. doi: 10.1080/028275802317221118. URL <https://doi.org/10.1080/028275802317221118>.
- UPM. UPM puunhinta, 2024. <https://www.upmmetsa.fi/puukauppa-kanssamme/ajankohtaista-puumarkkinoilla/> [Avattu: 29.2.2024].