

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
School of Engineering Science
Tuotantotalous

Tomi Parhiala

**LINEAARINEN OPTIMOINTI OSANA METSÄHAKKEEN
TOIMITUSLOGISTIIKAN SUUNNITTELUA JA KEHITTÄMISTÄ**

Tarkastajat:

Professori Pasi Luukka
KTT Jyrki Savolainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Engineering Science
Tuotantotalouden koulutusohjelma

Tomi Parhiala

Lineaarinen optimointi osana metsähakkeen toimituslogistiikan suunnittelua ja kehittämistä

Diplomityö

2022

86 sivua, 19 kuvaa, 8 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Pasi Luukka ja KTT Jyrki Savolainen

Hakusanat: metsähake, puupolttoaine, metsäbiomassa, lineaarinen ohjelmointi, optimointi, logistiikka

Keywords: wood chips, wood fuels, forest biomass, linear programming, optimization, logistics

Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen uusiutuvalla energialla edellyttää ympäristön kannalta kestäviä, taloudellisesti kannattavia ja toimitusvarmoja vaihtoehtoja. Kansallisten ilmasto- ja energiatarpeiden täyttyminen on riippuvainen metsähakkeen pitkän aikavälin saatavuuden varmistamisesta kilpailukykyisellä hinnalla ja laadulla. Kustannustehokkaan toimitusketjun todettiin olevan kriittinen tekijä metsähakkeen käytön kannattavuuden edistämiseksi.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan metsähakkeen toimituslogistiikan matemaattista optimointia. Työn tavoitteena on tunnistaa toimittajan näkökulmasta optimoinnin avulla saavutettavat hyödyt metsähakkeen toimitusketjussa, ja arvioida optimointimallin käytettävyyttä osana tutkimuksen kohdeyrityksen logistiikan suunnittelua.

Tutkimus koostuu teoriaosasta ja empiirisestä osasta. Tutkimuksen alkuosio keskittyy tarkastelemaan metsähakkeen toimitusketjun rakennetta, käytännön rajoitteita sekä arvoketjua. Arvoketjusta tunnistetaan logistiikan olennaiset kustannus- ja laatutekijät. Lisäksi käsitellään lineaarisen ohjelmoinnin menetelmiä metsähakkeen toimituslogistiikan mallintamiseksi. Tutkimuksen jälkimmäinen osio on kaksiosainen empiirinen tarkastelu, jossa ensin määritellään lineaarinen optimointimalli metsähakkeen logistiikan mallinnukseen, ja analysoidaan sitten mallin optimaalista ratkaisua.

Tulosten perusteella voidaan sanoa lineaarisella optimoinnilla saavutettavan merkittäviä hyötyjä metsähakkeen logistiikkakustannuksissa. Optimoinnin hyödyt perustuvat keskimääräisen toimitusetaisyyden lyhentämiseen tehostamalla alueellisen tarjonnan hyödyntämistä ja minimoimalla risteäviä materiaalivirtoja. Tulosten perusteella voidaan todeta lineaarisen optimointimallin soveltuvan kotimaisen metsähakkeen toimituslogistiikan taktisen tason suunnittelussa käytettäväksi työkaluksi. Optimoinnille havaittiin lisäksi käyttökohteita skenaarioanalyysissä ja taloudellisessa sekä operatiivisessa ennustamisessa. Jatkotutkimusaiheiksi tunnistettiin urakointiverkoston kapasiteetin ja välisiirtojen sisällyttäminen osaksi optimointimallia.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Engineering Science
Degree Programme in Industrial Engineering and Management

Tomi Parhiala

Linear optimization as a part of wood chip logistics planning and development

Master's thesis

2022

86 pages, 19 figures, 8 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Pasi Luukka and D.Sc. (Econ.) Jyrki Savolainen

Keywords: wood chips, wood fuels, forest biomass, linear optimization, linear programming, logistics

Replacing fossil fuels with renewable energy requires environmentally sustainable, economically viable and reliable alternatives. Meeting national climate and energy goals depends on ensuring the long-term availability of wood chips at a competitive price and quality. A cost-effective supply chain was found to be a critical factor in promoting the profitability of utilizing wood chips.

This thesis examines the mathematical optimization of wood chip logistics. The goal of this study is to identify the benefits achieved through optimization in the supply chain of wood chips. In addition, the usability of the optimization model as a part of logistics planning is evaluated by applying it in a real-world case at the target company of this study.

The thesis consists of a theoretical part and an empirical part. The first part focuses on examining the supply chain's structure, practical constraints and value chain. The essential cost and quality factors of logistics are identified from the value chain. In addition, linear programming methodology for modelling wood chip logistics is discussed. The last part of the study is a two-part empirical examination, where first a linear optimization model for wood chip logistics modelling is defined, and the optimal solution is then analyzed.

Based on the results linear optimization achieves significant benefits in the logistics costs of forest chips. The benefits of optimization are based on shortening the average delivery distance by improving the utilization of regional supply and minimizing intersecting material flows. Based on the results, it is concluded that a linear optimization model is suitable tool in tactical level planning of wood chip logistics. In addition, applications for optimization are found in scenario analysis and both in financial and operational forecasting. The inclusion of contractor network capacity and intermediate transfers to terminals as a part of the optimization model were identified as further research topics.

ALKUSANAT

Tämän diplomityön kirjoittaminen on ollut opintojen tapaan ajoittain työläs, mutta lopulta opettavainen ja jopa ajoittain viihdyttävä prosessi. Skinnarilassa vietettyjen vuosien aikana valmistuminen tuntui opintojen eri vaiheissa kaukaiselta ajatukselta. Nyt on kuitenkin jo aika kiittää työni toimeksiantajayritystä mielenkiintoisesta tutkimusaiheesta ja diplomityön mahdollistamisesta poikkeuksellisina aikoina. Poikkeusolot maailmassa ovat värittäneet koko kirjoitusprosessia, mutta projekti vietiin haasteista huolimatta lopulta maaliin. Erityiskiitos Matiakselle tämän työn ohjaamisesta sekä arvokkaista neuvoista esimiehenä matkan varrella.

Tahdon kiittää LUT-yliopistoa opiskelujeni mahdollistamisesta. Kiitos erityisesti diplomityön ohjaajalle Pasi Luukalle kärsivällisyydestä, joustavuudesta ja asiantuntevista neuvoista tämän prosessin aikana.

Viimeisenä kiitokset kuuluvat perheelleni ja ystävilleni, jotka ovat tukeneet opintojani ja kannustaneet loppuetapilla läpi diplomityöurakasta. Ystäviltä saatu vertaistuki ja perheen innokas valmistujaisjuhlien odotus ovat kannustaneet valmistumista kohti. Teidän tukenne on ollut korvaamatonta tällä matkalla ja myös tulevaisuudessa!

Vantaalla 9.12.2022

Tomi Parhiala

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	3
1.1	Tavoitteet ja rajaus	6
1.2	Aiheeseen liittyvää kirjallisuutta.....	7
1.3	Tutkimuksen toteutus ja menetelmät	12
1.4	Diplomityön rakenne	13
2	Metsähakkeen hankintaketju.....	15
2.1	Raaka-aine.....	15
2.2	Toimitusketju	17
2.2.1	Tienvarsihaketus.....	19
2.2.2	Terminaalihaketus	19
2.2.3	Käyttöpaikkahaketus	20
2.2.4	Tuotantoketjujen käyttö Suomessa.....	20
2.3	Arvoketju ja kustannukset.....	21
2.4	Haketus- ja kuljetuskustannukset.....	23
2.5	Käyttö ja laatutekijät	25
2.5.1	Kilpailuetu.....	26
2.5.2	Kausivaihtelu.....	27
2.5.3	Kosteuspitoisuus.....	27
3	Lineaarinen ohjelmointi	29
3.1	Lineaarisen ohjelmoinnin perusoletukset	30
3.2	Käsitteet ja määrittely	31
3.3	Ratkaisualgoritmi	33
3.4	Ratkaisun analysointi ja mallin validointi.....	37
3.4.1	Validointi.....	37

3.4.2	Postoptimaalinen analyysi.....	39
3.5	Kuljetusongelma	41
4	Metsähakevirtojen optimointi	43
4.1	Kohdeyritys.....	43
4.2	Ongelman määrittely.....	45
4.3	Aineiston kuvaus.....	46
4.3.1	Määrittelyaineisto.....	47
4.3.2	Validointiaineisto	50
4.4	Mallinnuksen menetelmät.....	55
4.5	Optimointimallin rakentaminen	56
4.6	Tulokset.....	59
4.7	Mallin validointi.....	67
4.8	Postoptimaalinen analyysi	67
4.8.1	Herkkyysanalyysi	68
4.8.2	Slack-muuttujien ja varjohintojen analyysi.....	69
4.9	Mallin jatkojalostus.....	71
5	Johtopäätökset.....	73
5.1	Jatkotutkimus ja -kehitys	76
	Lähteet	78

Liitteet

Liite 1. Tutkimuksen aikana suoritettavat vapaamuotoiset haastattelut kohdeyrityksessä

KUVALUETTELO

Kuva 1 Metsähakkeen kokonaiskäyttö raaka-ainejakeittain lämpö- ja voimalaitoksissa.....	16
Kuva 2 Metsähakkeen tuotantoketjut	18
Kuva 3 Metsähakkeen haketustapojen käyttö Suomessa	21
Kuva 4 Metsäenergian käyttöpaikkahinnan muodostuminen ja toimitusketjun toiminnot	22
Kuva 5 Metsähakkeen kustannusrakenne tienvarsi- ja terminaalihaketusketjuilla	23
Kuva 6 Kokonaiskustannukset eri tuotantoketjuilla kuljetusmatkan suhteen	24
Kuva 7 Metsähakkeen kokonaiskäyttö käyttökohteittain	25
Kuva 8 Esimerkki funktion $f(x)$ käyttäytymisestä ja useista ääriarvoista	32
Kuva 9 Konvekssi joukko (1) ja ei-konvekssi joukko (2)	32
Kuva 10 Lineaarisen optimointiongelman kulma- eli ääripisteet ja käypä alue.....	34
Kuva 11 Kuljetusongelma verkostona esitettynä	41
Kuva 12 Kohdeyhteyksen yksinkertaistettu hankinta- ja toimitusprosessi.....	45
Kuva 13 Metsähakevirtojen optimointimallin rakenne	47
Kuva 14 Logistiikkakustannukset eri tuotantoketjuilla toteumana ja keskitaulukkohintana ...	48
Kuva 15 Kysynnän alueellinen jakauma	52
Kuva 16 Kysynnän suhteellinen kausivaihtelu validointiaineistossa	53
Kuva 17 Tarjontapisteiden suhteelliset frekvenssijakaumat ja tarjonnan jakaumat.....	54
Kuva 18 Toteutuneet ja optimoidut metsähakevirrat alueella 1	63
Kuva 19 Toteutuneet ja optimoidut metsähakevirrat kahden vastuualueen välillä	64

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1 Laskenta-aineisto.....	52
Taulukko 2 Optimointimallin kaavojen selitteet	58
Taulukko 3 Optimointimallin tulokset	60
Taulukko 4 Optimointimallin tulokset alueittain	61
Taulukko 5 Optimointimallin tulokset tuotantoketjuittain	61
Taulukko 6 Kustannusparametrien herkkyysanalyysin tulokset	68
Taulukko 7 Kuljetettavuus- ja yhteensopivuusrajoitteiden herkkyysanalyysin tulokset.....	69
Taulukko 8 Rajoitteiden yli- ja alijäämät	70

1 JOHDANTO

Uusiutuvan energian rooli energian ja lämmön tuotannossa kasvaa tulevaisuudessa osana Suomen kansallista ilmasto- ja energiastrategiaa, jonka pyrkimyksenä on saavuttaa EU:n ilmasto- ja energiatavoitteet vuoteen 2030 sekä hiilineutraali Suomi vuoteen 2035 mennessä. Strategia kasvattaa puupolttoaineista erityisesti metsähakkeen osuutta energian ja lämmön tuotannossa. Strategian pohjana toimii tavoite energijärjestelmästä, joka mahdollistaa kustannustehokkaan kansantalouden kasvun, on ympäristön näkökulmasta kestävä sekä takaa riittävän toimitusvarmuuden. Hallituksen esittämän strategisena ohjeena toimivan ilmastotiekartan mukaan erityisen tärkeää on toimitusvarmuus sekä metsäbiomassan kannattavuus. Osana tavoitetta lisätä uusiutuvan energian käyttöä eniten kasvaa metsähakkeen käyttö. Myös metsähakkeen tarjonnan odotetaan kasvavan seurauksena metsäteollisuuden investoinneista ja myönteisistä kehityksistä. Metsähakkeen osuuden kasvattaminen näkyy osana energiaverotusta, jossa kannustetaan käyttämään puupolttoaineista ensisijaisesti metsähaketta yhdistetyssä lämmön ja sähkön tuotannossa sekä lämmön erillistuotannossa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, 11-40; Koljonen et al. 2017, 45-46) Puupolttoaineista puunjalostusteollisuuden sivutuotteet, kuten puru ja kuori, hyödynnetään käytännössä täysmääräisesti, joten kasvu kohdistuu erityisesti metsäpolttoaineisiin (Laitila et al. 2010, 9).

Valtioneuvoston eduskuntaan kesäkuussa 2022 lähettämä tuore strategia painottaa huolto- ja toimitusvarmuuden roolia sekä EU:n tavoitteita irtautua venäläisestä energiasta. Strategia ottaa kantaa tuonnin aiheuttamaan energiahuoltovarmuusriskiin sekä kotimaisen metsähakkeen suhdanne- ja logistiikkariskeihin. Strategian olennainen tavoite on varmistaa puupolttoaineiden saatavuus ja kestävä toimitusketju edistämällä Kemera-kannusteita (Kestävän metsätalouden rahoitusjärjestelmä) sekä vahvistamalla biomassaterminaalien verkostoa. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022, 10-78)

Valtion budjettiriihessä tehdyt päätökset turpeen verotuksesta kiihdyttivät osaltaan puupolttoaineiden kysynnän kasvua. Turpeen verotusta nostettiin merkittävästi osana lämmityspolttoaineiden veron korotusta. Turpeen käytön puolittamiseksi vuoteen 2030 mennessä otettiin päästöoikeuden rinnalle verotuksessa lisäksi käyttöön lattiahintamekanismi vuodesta 2022 alkaen. (Valtioneuvosto 2020) Viime vuosina metsäalan kasvanut arvonlisäys ja

liikevaihto on sivutuotteiden sekä jätetuun polton muodossa kasvattanut puupolttoaineiden käyttöä lämmön ja voiman tuotannossa. Myös metsähakkeen kilpailukyvyyn odotetaan nousevan päästöoikeuksien hintojen kasvaessa. (Maa- ja metsätalousministeriö 2019)

Uusiutuvan energian osuus energian kokonaiskulutuksesta Suomessa vuonna 2021 oli 42 prosenttia. Vastaavasti puupolttoaineiden käyttö nousi tilastointihistorian korkeimmalle tasolle niiden kattaessa suurimman osuuden (30 %) kokonaisenergiankulutuksesta ja 70 prosenttia kaikista uusiutuvien polttoaineiden kulutuksesta. Puupolttoaineiden osuus käytöstä on kasvanut tasaisesti viimeisen vuosikymmenen aikana. Vuoden 2020 aikana uusiutuvan energian osuus ohitti fossiilisten polttoaineiden ja turpeen osuuden energiankulutuksesta (Tilastokeskus 2021).

Metsähakkeen osuus lämpö- ja voimalaitosten kiinteiden puupolttoaineiden käytöstä vuonna 2021 oli 41 prosenttia. Kasvu edellisen vuoteen oli 25 prosenttia 9,5 miljoonaan kuutiometriin. Puupolttoaineiden kokonaiskäyttö lämpö- ja energialaitoksissa oli suurin tähän mennessä tilastoitu. (Luonnonvarakeskus 2021a) Etelä-Suomen suurten kaupunkien lämmöntuotannon siirtymisen biopohjaiseksi ennustetaan muuttavan metsähakkeen käytön kasvavaksi (Korpinen et al. 2019, 6). Metsähakkeen käytön sähkön- ja lämmöntuotannossa arvioitiin energia- ja ilmastostrategian perusskenaariossa vuonna 2030 olevan noin 14,5 miljoonaa kuutiometriä, mikä tarkoittaisi käytön lähes kaksinkertaistumista 10 vuodessa. Lisäksi puubiomassan kysynnän liikenteen biopolttoaineiden valmistuksessa arvioitiin asettuvan 3-4 miljoonan kuutiometrin välille. (Työ ja elinkeinoministeriö 2017, 81) Tuoreessa HIISI-hankkeessa ilmasto- ja energiastrategian skenaarioissa käyttö oli kasvanut 16–17 miljoonaan kuutiometriin vuodessa, joka ei vielä sisällä Venäjän tuonnin päättymisen vaikutusta määriin (Työ ja elinkeinoministeriö 2022, 126). Kasvavan käytön tavoitteiden saavuttamiseksi on metsähakkeen toimitusvarmuutta ja laatua parannettava sekä tuotantokustannuksia alennettava (Laitila et al. 2010, 9).

Työn taustalla on tarve vastata ilmasto- ja energiastrategian sekä verotuksen myötä kasvaviin volyymeihin kohdeyrityksen metsähakkeen logistiikkasuunnittelussa. Neova odottaa merkittävää kasvua puupolttoaineiden myynnissä ja erityisesti metsähakkeen kysynnässä. Yrityksen tavoitteet ovat linjassa toimintaympäristön muutosten kanssa, sillä tavoitteeksi on

asetettu panostus uusiutuvaan energiaan. Neovan asiakaskunta arvostaa puunhankinnassa voimakkaasti kotimaisuutta sekä alkuperätodennusta. Kotimaisen energiapuun toimitusketjua koskettavat maamme ominaiset piirteet, kuten kylmä ilmasto, pitkät kuljetusetäisyydet sekä omat raaka-ainevarat (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, 14). Edellä mainitut tekijät yhdessä energiaintensiivisen teollisuuden ja korkean elintason kanssa nostavat myös Suomen energian kokonaiskulutusta (Antikainen 2007, 9). Kannattavan ja kilpailukykyisen tuotteen tarjoaminen vaatii siten kasvavaan volyyymiin skaalautuvia toimintatapoja logistiikkasuunnittelussa. Kohdeyrityksen kasvustrategiaan on linjattu digitalisaation hyödyntäminen osana skaalautuvaa ja kustannustehokasta toimintamallia.

Erityisesti jäännösbiomassa on kerännyt vahvaa tukea uusiutuvana energialähteenä Suomessa. Metsäbiomassojen käyttö on hyödyllistä kansantaloudelle, mutta niiden tuottaminen ei ole aina ollut välttämättä tuottavaa liiketoimintaa. (Hakkila 2006a, 287) Samojen ilmiöiden vallitessa myös muualla maailmassa on metsäbiomassan toimitusketjun toiminnan tehostamista ja optimointia käsittelevien tutkimusten määrä kasvanut. Metsähakkeesta arvokkaiden ja käyttökelpoisten fossiilisia polttoaineita korvaavien tuotteiden kehittäminen on riippuvainen metsähakkeen pitkän aikavälin saatavuuden takaamisesta kilpailukykyisellä laadulla ja hinnalla. Volyymien kasvaessa useat tekijät vaikeuttavat suunnittelun toteuttamista tehokkaasti nykymuodossaan. Puupolttoaineiden toimitusketju korjuuhetkestä käyttöön on pitkäkestoinen ja monivaiheinen, minkä vuoksi suunnittelun merkitys logistiikassa korostuu. Lisäksi energiapuubarastot sijaitsevat maantieteellisesti laajalla ja hajanaisella alueella, mikä vaikeuttaa logistiikan keskittämistä sekä suunnittelua. Varastojen saatavuutta rajoittavat kausivaihtelu ja säätila. Fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna puupolttoaineiden energiasisältö on pieni ja kuljetettavat volyymit suuria, mikä heijastuu suoraan logistiikkakustannuksiin. Kustannustehokas toimitusketju on siten kriittinen tekijä metsähakkeen kannattavuuden parantamisessa ja fossiilisten polttoaineiden korvaamisessa.

Tämä diplomityö keskittyy metsähakkeen toimitusketjun optimointiin ja siten kohdeyrityksen logistiikkasuunnittelun kehittämiseen. Työn motivaationa on tarve kehittää logistiikan suunnittelua ja toimitusketjun kannattavuutta vastaamaan kasvavia volyyymeja, jotka vaikeuttavat suunnittelua nykyisessä muodossa. Tutkimus kattaa metsähakkeen logistiikan

mallinnuksen, optimointimallin määrittelyn, käyttöönoton ja tulosten analysoinnin sekä käyttökohteiden arvioinnin kohdeorganisaatiossa.

1.1 Tavoitteet ja rajaus

Tämän tutkimuksen tavoitteena on auttaa Neova Oy:ta jalostamaan uutta tietoa metsähakkeen toimituslogistiikasta ja hyödyntää tätä tietoa logistiikkasuunnittelun kehityksessä. Neova toimii valtakunnallisesti paikallisten biopolttoaineiden toimittajana energian ja lämmön tuotantoon. Viime vuosien aikana toiminnan painopistettä on siirretty voimakkaasti puupolttoaineisiin ja erityisesti metsähakkeen kysyntä on kasvanut. (Neova-konserni 2020, 5-13) Logistiikan suunnitteluprosessi on pysynyt pitkälti manuaalisena, asiantuntijätietoon ja vakiintuneisiin kannattavuusoletuksiin perustuvana. Tämän diplomityön tavoitteena on määrittellä metsähakkeen toimituslogistiikan optimointimalli kohdeyritykselle sekä mallin tuloksia analysoimalla tunnistaa ongelmia nykyisessä suunnitteluprosessissa. Tulosten perusteella tehtyjä havaintoja arvioidaan ja jalostetaan nykyisen suunnitteluprosessin kehitysehdotuksiksi. Lisäksi arvioidaan optimointimallin käytettävyyttä osana logistiikan suunnittelua. Optimointimallin tavoitteena on käsitellä yrityksen valtakunnallista logistiikkaa kokonaisuutena ja kehittää suunnittelua minimoimalla logistiikkakustannukset.

Tämän tutkimuksen suunniteltu rakenne voidaan jakaa kahteen osaan. Ensin pyritään määrittämään optimaalinen toimitussuunnitelma hyödyntämällä matemaattista optimointia. Toiseksi pyritään analysoimaan optimoinnin tuloksia sekä tunnistamaan nykyisen suunnitteluprosessin heikkouksia ja kehityskohtia. Tutkimuskysymyksiksi muodostuvat seuraavat:

1. Millaisia hyötyjä matemaattisen optimoinnin avulla saavutetaan metsähakkeen toimitusketjussa?
2. Miten optimointimallin tuloksia voidaan hyödyntää logistiikkasuunnittelussa?

Ensimmäiseen tutkimuskysymykseen vastataan muotoilemalla mahdollisimman tarkasti nykytilan rajoitteet huomioon ottava optimointimalli sekä analysoimalla sillä saavutettuja tuloksia, joiden vertailukohtana käytetään kohdeyrityksen nykytilaa ja tietoa historiallisesta toteumasta. Toisen tutkimuskysymyksen kohdalla suoritetaan vapaamuotoisia haastatteluja

kohdeorganisaatiossa ja arvioidaan tuloksia analysoidessa havaittuja ongelmia sekä niiden juurisyytä. Tämän kautta pyritään samaan käsitys siitä, millä päätöksenteon tasolla optimointimallia voidaan hyödyntää, miten suunnittelua voidaan kehittää havaittujen ongelmien perusteella ja pystytäänkö optimointimallia hyödyntämällä vastaamaan havaittuihin ongelmiin.

Empiirisestä näkökulmasta tutkimus rajataan kohdeyrityksen kautta saatavilla oleviin tietoihin. Tietojen, kuten kysynnän ja tarjonnan, epävarmuutta ei oteta huomioon optimointimallissa, mutta tiedon luotettavuutta pyritään arvioimaan, sillä se rajoittaa optimointimallin käyttökohteita logistiikkasuunnittelussa. Työssä optimointimalli rajataan käsittelemään metsähakkeen toimitusketjua vain logistiikan eli varastoinnin, haketuksen sekä kaukokuljetuksen osalta. Metsähakkeen toimituslogistiikkaa käsitellään materiaalivirtoina, joten yksittäisiä toimituksia ei mallinneta. Ongelmaa lähestytään kohdeyrityksen eli toimittajan näkökulmasta. Optimoinnin aikaikkuna rajataan keskipitkälle aikavälille. Logistiikan kehitystavoite puolestaan rajataan yhteen taloudelliseen tavoitteeseen. Ympäristöllisiä ja sosiaalisia tavoitteita ei kuitenkaan jätetä täysin huomiotta, sillä toimituslogistiikan kontekstissa taloudellinen tavoite edistää myös ympäristöllisiä ja sosiaalisia tavoitteita. Tutkimuksen matemaattinen optimointi perustuu lineaariseen ohjelmointiin.

Diplomityön tavoitteena ei ole löytää yhtä oikeaa tapaa suunnitella yrityksen toimituslogistiikkaa matemaattista optimointi hyödyntämällä, vaan tehdä nykyisestä prosessista ja metsähakkeen logistiikasta havaintoja, jotka auttavat kohdeyritystä tulevaisuudessa. Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää yritysten arvioidessa oman logistiikkasuunnittelunsa tehokkuutta ja kehitysmahdollisuuksia. Lisäksi työssä luotu malli auttaa ymmärtämään metsäbiomassan toimitusketjun mallintamisen käytännön rajoitteita ja ongelmia.

1.2 Aiheeseen liittyvää kirjallisuutta

Tämän kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on esitellä, arvioida ja luokitella lineaarista optimointia metsäbiomassan toimitusketjussa käsittelevää aikaisempaa tutkimusta käytettyjen menetelmien, rajausten ja tulosten perusteella. Asiaankuuluvan kirjallisuuden tutkiminen on oleellinen osa mitä tahansa tutkimusta ja luo alustan tiedon kehittämiseksi sekä auttaa

havainnollistamaan tutkimuksen jatkokohteita. (Webster & Watson 2002, 13-14) Tässä tutkimuksessa tiedonhaku suoritetaan hyödyntäen LUT-tiedekirjaston tietokantoja, Scopus-tietokantaa sekä Googlen hakupalveluita.

Webster ja Watson (2002, 16) suosittelevat rakenteellista lähestymistapaa kirjallisuuskatsauksen tiedon hakuun. Asiaankuuluvan tiedon tunnistamisen prosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen:

1. Tiedonhaku akateemisista tietokannoista tutkimuksen kontekstin mukaisesti määritetyillä haku- ja avainsanoilla
2. Artikkeleiden tunnistaminen käymällä läpi ensimmäisessä vaiheessa valittujen artikkelien lähdeviittaukset
3. Lopuksi haetaan aikaisemmissa vaiheissa tunnistettuihin tärkeimpiin artikkeleihin viittäviä tutkimuksia

Matemaattinen optimointi on levinnyt bioenergian ja metsäbiomassan toimitusketjua käsitteleviin tutkimuksiin puunjalostusteollisuudesta, jonka hyödykevirtojen mallinnuksessa lineaarista ohjelmointia on hyödynnetty jo 1960-luvulta lähtien (Abel 1972). Kun hakujen tuloksia tarkastellaan ajan suhteen 2000-luvulla, havaitaan kasvava trendi niin yleisesti bioenergiaa ja biomassaa käsittelevissä tutkimuksissa kuin myös tarkemmin toimitusketjun optimointia tutkivassa kirjallisuudessa.

Biomassan toimitusketjun optimointia käsitteleviä tutkimuksia on koostettu ja luokiteltu eri tekijöiden perusteella useissa tutkimuksissa 2010-luvulla. Luokittelu tapahtuu ensisijaisesti päätöksenteon tasojen perusteella strategiseen, taktiseen sekä operatiiviseen suunnitteluun. Tasot määritellään suunnitteluhorisontin pituuden perusteella. Strateginen päätöksenteko viittaa pitkän aikavälin monivuotiseen suunnitteluun. Strategista suunnittelua tarkastelevat tutkimukset käsittelevät usein esimerkiksi biomassan toimitusketjun rakennetta, sijaintipäätöksiä ja eri tekijöiden elinkaariarviointia. (Malladi ja Sowlati 2018, 587) Biomassan logistiikan suunnittelu, sisältäen materiaalivirtojen suunnittelun ja varastohallinnan, luokitellaan osaksi sekä taktista että operatiivista päätöksentekoa riippuen optimoinnin aikajänteestä. Taktisiksi päätöksiksi mielletään keskipitkän aikavälin päätökset, joita käsitellään usein monijaksoisina. Operatiiviset päätökset koskevat lyhyen aika välin

suunnittelua. (De Meyer et al. 2014, 659-660, Weintraub et al. 2008, 269) Operatiivinen tutkimus aiheesta on kuitenkin yhä lasten kengissä (Malladi ja Sowlati 2018, 587).

Taktisen ja operatiivisen tason tutkimuksissa kohdefunktiona ovat toimineet pääasiassa kustannusten minimointi tai tuottojen maksimointi. Valtaosa tutkimuksista keskittyy siten yhteen taloudelliseen tavoitteeseen, mutta strategisesta tutkimuksesta tunnustetaan myös yhdistettyjä taloudellisia ja ympäristöllisiä tavoitteita. (Ba et al. 2016, 977-979; Cambero ja Sowlati 2014, 69; Malladi ja Sowlati 2018, 595)

Operaatioanalyysin näkökulmasta tutkimuksia kategorisoidaan hyödynnettyjen menetelmien mukaan lineaariseen (LP), epälineaariseen (NLP) sekä kokonais- (IP) ja sekalukuoptimointiin (MIP). LP-, IP- ja MIP-mallit ovat laajalti käytettyjä menetelmiä metsäbiomassa toimitusketjun ongelmien ratkaisemisessa. (Acuna et al. 2019, 124-125; De Meyer et al. 2013, 661-662) Kaikkien järjestelmien mallinnukseen optimointi ei ole käytännöllinen vaihtoehto. Merkittävästi epävarmuutta ja vuorovaikutuksia sisältävien monimutkaisten järjestelmien mallinnuksessa hyödynnetään myös simulointimalleja. (Wolfsmayr ja Rauch 2014, 214) Viimeisimmät trendit tutkimuksessa huomioivat lisäksi biomassan hajautetun saatavuuden, ja paikkatietojärjestelmiä (GIS) käytetäänkin usein simulointi- ja optimointimallien rinnalla (Malladi ja Sowlati 2018, 595). GIS-järjestelmien ja paikkatiedon yleistymisen myötä suunnittelukäytännöissä on osoitettu kasvavaa huolta tilasuhteita ja ympäristöolosuhteita kohtaan (Weintraub et al. 2008, 270).

Kotimaisessa tutkimuksessa on keskitytty pääasiassa toimitus- ja arvoketjun eri osien haasteiden, kehittämistarpeiden ja kustannusten käsittelyyn. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteita ja kehityskohteita on tutkittu VTT:n asiantuntijakyselyyn perustuvassa tutkimuksessa (Laitila et al. 2010), minkä lisäksi laajemmat kehittämisohjelmat ovat tutkineet koko tuotantoketjun edellytyksiä. (Asikainen et al. 2013) Lisäksi terminaalijärjestelmien toimivuutta metsähakkeen käyttömahdollisuuksien ja kannattavuuden edistämiseksi on tutkittu laajemmin esimerkiksi simulointimallien avulla. (Klemetti 2012; Rusanen 2013). Yksi painopiste tuoreemmassa tutkimuksessa on ollut toimitusketjun arvoketjussa ja kustannuksissa (Ihalainen ja Niskanen 2010; Nummelin et al. 2015). Arvoketjun

käsittelyssä sivutaan metsähakkeen laatutekijöitä, joita tarkasteltiin tarkemmin mm. Metlan työraportissa (Ikonen et al. 2013).

Kosteuspitoisuus ja varastointi on todettu puupolttoaineiden toimitusketjun tärkeimmiksi laatutekijöiksi jo 1990-luvulla. Jirjis (1995) tarkasteli puubiomassan kuivaamiseen käytettyjä tekniikoita ja niiden vaikutusta kuiva-ainetappioihin sekä polttoaineen laatuun. Lisäksi tutkimus käsitteli kuivumisen matemaattista mallintamista ja mallien validointia. Erilaisia malleja kosteuspitoisuuden ennustamiseen on sittemmin kehitetty useita (Heiskanen et al. 2014; Routa et al. 2015; Sikanen et al. 2013). Kosteuspitoisuus ja kuljetusetäisyys ovat merkittäviä tekijöitä metsäbiomassan toimituksessa tienvarsivarastosta käyttöpaikalle. Windisch ja muut (2015) tutkivat Suomessa energiapuun raaka-aineen allokointia edellä mainittujen tekijöiden suhteen hyödyntämällä simulointimallia. Tulosten mukaan kysynnän huippuhetkellä saavutettiin 29 prosenttia ja koko vuoden ajalta 8 prosenttia korkeampi energian tuotto, minkä lisäksi toimituskustannukset madaltuivat 7 prosenttia.

Arvoketjun tarkastelussa havaitaan logistiikan kattavan suuren osan metsähakkeen kustannuksista sekä toimitusketjun haasteista. Tästä huolimatta metsähakkeen tai metsäbiomassan optimointia käsitteleviä tutkimuksia on Suomessa julkaistu varsin vähän. Liikenneviraston julkaisemassa tutkimuksessa käsiteltiin energiapuuvirtojen valtakunnallisia virtoja optimointimallin avulla (Iikkanen et al. 2011), mutta yksittäisten toimijoiden näkökulmasta taktisella tasolla optimointia on tarkasteltu vähemmän.

Acuna ja muut (2012) tutkivat lineaarisen ohjelmoinnin menetelmin kosteuspitoisuuden vaikutusta varastointi-, haketus- ja kuljetuskustannuksiin yhdelle CHP-laitokselle. Metsähakkeelle määriteltiin tutkimuksessa kolme erilaista toimitusketjua raaka-ainejakeen mukaan: kokopuu, pienpuu ja hakkuutähde. Optimoinnin tavoitteena oli minimoida toimitusketjun kustannuksia ja määrittää korjatun biomassan määrää, joka tarvitaan täyttämään laitoksen kysyntä. Optimoinnin suunnitteluhorisontti oli 24 kuukautta ja päätöksenteko toteutettiin mallissa kuukausitasolla. Tutkimuksen tuloksena havaittiin kysynnän täyttämiseen vaaditun biomassan määrän olevan 33 prosenttia matalampi verrattuna skenaarioon, jossa varastointia ja puun kuivumista ei huomioida.

Ensimmäisten joukossa materiaalivirtauksia metsäpolttoaineiden toimitusketjussa lineaarista optimointia hyödyntäen tutkivat Eriksson ja Björheden (1989). Tutkimuksessa mallinnettiin viiden teoreettisen tuotantoketjun biomassavirrat yhdelle laitokselle joko suoraan tienvarsivarastosta tai terminaalin kautta. Malli kuvasi virtaukset metsäpolttoaineiden kuljetuksessa, varastoinnissa ja haketuksessa pitkällä aikavälillä. Tuloksina saavutettiin optimaaliset materiaalivirrat käyttäjälaitoksen kysynnän täyttämiseksi, minkä perusteella terminaalien todettiin aiheuttavan suuremmat toimituskustannukset.

Akhtari ja Sowlati (2013) tutkivat lineaarisen optimoinnin hyödyntämistä optimaalisten metsäbiomassavirtojen määrittämiseksi kaukolämpölaitoksille Kanadassa minimoimalla toimituskustannukset. Ongelmalle määriteltiin vuoden aikaikkuna kuukauden aika-askelilla, joille määritettiin optimaalinen määrä metsähaketta joko suoraan tarjontapisteiltä tai terminaalien kautta toimitettavaksi ja hakettavaksi. Tutkimuksen tuloksena todettiin välivarastohaketuksen olevan kannattavin tuotantoketju ja vain 10 prosenttia toimituksista suoritettiin terminaalien kautta. Tulokset ovat mielenkiintoisia, sillä terminaalien käyttö on Suomessa vakiintunutta ja laajasti käytössä keskitettyyn haketukseen perustuvissa tuotantoketjuissa (Laitila et al. 2010, 34-39).

Gunnarsson ja muut (2004) puolestaan käsittelivät metsätähteiden materiaalivirtojen ohjaamista lämmityslaitoksille taktisella päätöksenteon tasolla toimittajan näkökulmasta muodostamalla laajan sekalukuoptimointimallin, jonka tavoitteena oli minimoida kysynnän täyttämisen kokonaiskulut. Ongelman ratkaisemiseksi kohtuullisessa ajassa kehitettiin heuristinen lähestymistapa. Tutkimuksessa hyödynnettiin monijaksoista optimointia, jonka suunnitteluhorisontti oli vuosi. Malliin sisällytettiin useita raaka-ainajakeita ja tarjontapisteitä sekä mahdollisuus välisiirtojen mallintamiseen kausivaihtelun tasapainottamiseksi. Tarjontaa ei rajoitettu määrällisesti. Sen sijaan mallin päätökset käsittelevät tarjontapisteiden avaamista ja toimitusketjun valintaa. Mallin havaittiin tuottavan parempia tuloksia kuin manuaalinen logistiikkasuunnittelu, mutta huomionarvoista oli havainto vastaavien tutkimuksien harvinaisuudesta.

Han ja Murphy (2012) tarkastelivat matemaattisen optimoinnin hyötyjä operatiivisella tasolla osana kuljetusliikkeen puubiomassan kuormien aikataulutus ongelmaa. Tapaustutkimuksen

optimointimallin kohdefunktion tavoitteena oli minimoida kuljetuskustannukset ja työaika. Tutkimuksen perusteella saavutettiin merkittävästi matalammat kustannukset ja työaika, mutta rajoitteiksi tunnistettiin mallin keskittyminen vain maantiekuljetuksiin huomioimatta tienvarsivarastojen ja korjuupaikkojen vaatimuksia.

Optimointimalleja käytetään usein myös yhdessä paikkatietojärjestelmien kanssa. Kasvavan metsäbiomassan kysynnän tyydyttämiseksi ja tarjonnan varmistamiseksi Kanzian ja muut (2009) tutkivat tarjontaskenaarioita Itävallassa GIS-järjestelmiä ja lineaarisen ohjelmoinnin menetelmiä yhdistämällä. Tuloksissa todettiin käyttöpaikalla tapahtuvan haketuksen johtavan edullisimpaan toimitusjärjestelmään ja metsätähteestä valmistetun hakkeen olevan suositeltava polttoaine vain suuremmille laitoksille laatutekijöiden vuoksi. Terminaalivarastointi tunnistettiin tasaisen läpivuotisen tarjonnan edellytykseksi, vaikka kysynnän kasvamisen ja terminaalien käytön nähtiinkin johtavan suurempiin logistiikkakustannuksiin.

Tutkimusten tuloksista havaitaan selkeitä eroavaisuuksia Suomessa vakiintuneisiin metsähakkeen toimitusketjuihin. Lisäksi kokonaisuutena aikaisemman tutkimuksen puutteiksi voidaan tunnistaa sidosryhmien vähäinen osallistuminen tiedon keräämiseen, mallin määrittelyyn ja arviointiin.

1.3 Tutkimuksen toteutus ja menetelmät

Tämä tutkimus koostuu teoriaosuudesta ja empiirisestä tutkimuksesta. Teoriaosuudessa tutustutaan metsähakkeen toimitusketjuun sekä lineaariseen ohjelmointiin liittyvään kirjallisuuteen. Työhön käytetty kirjallisuus kattaa yleisimmät alan tutkijoiden keskuudessa tunnistetut ajankohtaiset viitekehykset.

Tutkimuksen empiirinen osa toteutetaan tapaustutkimuksena, jonka aineisto perustuu Neovan toiminnasta saatuihin tietoihin. Yrityksen metsähakkeen toimitusketjun toimintaa sekä logistiikan suunnitteluprosessin nykytilaa kartoitetaan pääosin vapaamuotoisten haastatteluiden pohjalta. Kerättyä tietoa käytetään mallintamaan optimointimallin kohdefunktio sekä rajoitteet. Optimointimallin parametreina hyödynnettävä data sekä tulosten analysoinnissa vertailukohtana käytetyt tiedot ovat saatavilla yrityksen tuotantotietokannassa. Optimointimalli

toteutetaan käytännössä Python-ohjelmointikielellä matemaattiseen optimointiin soveltuvan Pulp-kirjaston avulla.

Tutkimuksen toteutus voidaan jakaa neljään vaiheeseen. Ensimmäinen vaihe sisältää aiheeseen liittyvän kirjallisuuden läpikäynnin sekä teoreettisten viitekehysten kartoituksen. Lisäksi tässä vaiheessa määritellään tarkasti tutkimukseen rajatut aiheet. Toisessa vaiheessa määritellään ja kerätään optimointimallin vaatimat tiedot ja tiedonlähteet kohdeyrityksestä. Tämä osa tutkimuksesta muodostuu vapaamuotoisista henkilöhaastatteluista ja keskusteluista kohdeyrityksen asiantuntijoiden kanssa. Tutkimuksen kolmannessa vaiheessa yhdistetään edeltävissä vaiheissa kerättyä tietoa optimointimallin muodostamiseen ja määrittelyyn. Kirjallisuuskatsaus ja teoriaosuus toimivat pohjana mallin ja sen rajoitusten määrittelylle. Neova Oy:n toiminnasta kerätty tieto puolestaan jalostaa nämä oletukset lopulliseen muotoon. Viimeiseen vaiheeseen sisältyy mallin käyttöönotto ja tulosten analysointi. Tulosten perusteella pyritään vastaamaan asetettuihin tutkimuskysymyksiin.

1.4 Diplomityön rakenne

Tämä työ sisältää viisi lukua, joista luvut kahdesta kolmeen muodostavat tutkimuksen teoriaosuuden. Toinen luku tarkastelee energiapuun toimitusketjua työn tavoitteiden ja rajausten mukaisesti keskittyen erityisesti ketjun laatu- ja kannattavuustekijöihin. Luku esittelee toimitusketjun muotoon vaikuttavat tekijät ja laajentaa työn taustaa tarpeesta toimitusketjun optimoinnille tunnistamalla arvon muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä, ja keskittyy tuomaan esille logistiikkasuunnittelun käytännön rajoitteita. Työn kannalta olennaiset alakohtaiset käsitteet esitellään ja määritellään. Luvussa sivutaan myös muita energiapuun logistiikan kannalta olennaisia tekijöitä, jotka eivät sellaisenaan sisälly tutkimuskysymyksiin, mutta tunnistetaan tärkeiksi jatkokehityksen kohteiksi.

Kolmas luku käsittelee tarkemmin sekä tässä työssä että aikaisemmassa tutkimuksessa hyödynnettyä lineaarisen ohjelmoinnin teoriaa. Luku sisältää kuvauksen lineaarisen ohjelmoinnin matemaattisista perusteista, ratkaisualgoritmeista sekä optimointiongelman muodostamisesta. Lisäksi luvussa käsitellään optimointiongelman tuloksiin vaikuttavia

tekijöitä, mallin validointia ja ratkaisun analysointia. Lopuksi esitellään tässä tutkimuksessa muodostettu lineaarisen optimoinnin ongelma eli kuljetusongelma.

Tutkimuksen neljännessä luvussa laajennetaan edellisessä luvussa esiteltyä teoriaa käytännön ongelman muodostamiseen ja ratkaisuun. Luku esittelee kohdeyrityksen käytännön ongelman ja optimointimalliin sisällytetyt muuttujat, muuttujille asetetut rajoitteet, muut parametrit sekä optimoinnin kohdefunktion. Optimointimalli kuvataan yksityiskohtaisesti matemaattisessa muodossa. Luku sisältää myös kuvauksen tehdystä käytännön tutkimuksesta, selonteon kohdeyrityksestä, työhön liittyvistä prosesseista sekä aineistosta ja empiiriseen tutkimukseen liittyvistä ongelmista ja käytännön rajoitteista. Lisäksi esitellään tarkka kuvaus optimoinnin ratkaisusta ja siihen liittyvät perustelut sekä rajoitukset.

Viides luku kokoaa tutkimuksen havainnot johtopäätöksiksi ja käsittelee suoraan tutkimuskysymyksien rajaamia aiheita. Luvussa vastataan tutkimuskysymyksiin ja arvioidaan tutkimuksen lopputulosta suhteessa työn tavoitteisiin. Lisäksi työn tulosten rajoitteet tunnistetaan ja määritetään suunta jatkokehitykselle kohdeyrityksessä sekä tunnistetaan kohteita tulevalle tutkimukselle aiheeseen liittyen.

2 METSÄHAKKEEN TOIMITUSKETJU

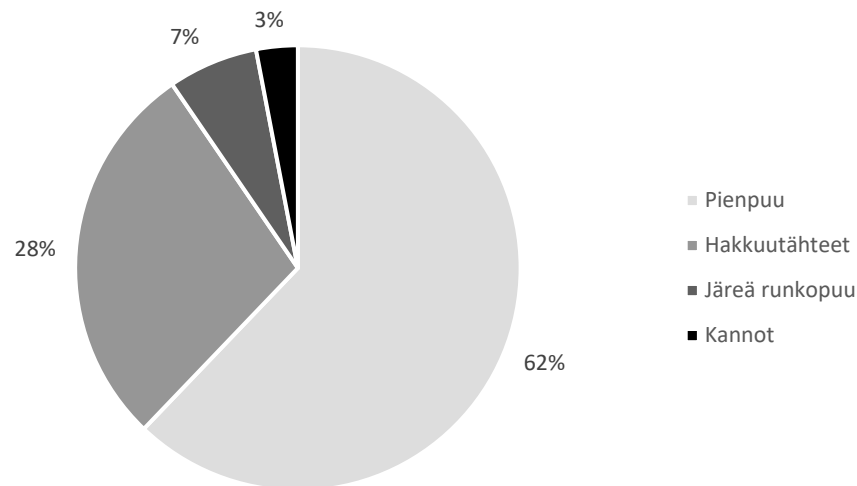
Metsähake kuuluu puupolttoaineisiin, joka toimii yleisnimityksenä suoraan tai epäsuorasti puubiomassasta peräisin oleville biopolttoaineille (Alakangas et al. 2016, 16). Puuhakkeella tarkoitetaan mekaanisesti hakettua tai murskattua puuta. Metsähake toimii yleisnimityksenä metsäbiomassasta tuotetulle hakkeelle. Puupolttoaineista puhuttaessa käytetään varsinkin metsäenergian toimituksissa erilaisia kauppanimikkeitä. Puupolttoaineiden tuottajille suunnattu laatuohje erotelee metsähakkeen muusta polttohakkeesta raaka-aineena käytetyn biomassan perusteella. (Alakangas ja Impola 2013, 9-16) Luonnonvarakeskus (2016) määrittelee metsähakkeen koneellisesti valmistetuksi hakkeeksi, jonka raaka-aineena toimii puu, jota ei ole aikaisemmin käytetty muuhun käyttötarkoitukseen. Energiapuulla viitataan tässä työssä energiakäyttöön tarkoitettuun metsähakkeeseen- ja murskeeseen.

2.1 Raaka-aine

Puupolttoaineet koostuvat ominaisuuksiltaan erilaisista raaka-ainejakeista. Puupolttoaineet voidaan luokitella raaka-aineluokituksen (SFS-EN ISO 17225-1) mukaan primäärisiin, sekundäärisiin ja tertiäärisiin puubiomassoihin. Metsähakkeen raaka-aineena toimivat primääriset eli ensisijaiset biomassat. Metsäpolttoaineisiin lukeutuvat luonnon- ja istutusmetsän puubiomassat sekä muu luonnonpuu, kuten kokopuu, rankapuu, hakkuutähteet ja kannot. Sekundääriset eli toissijaiset biomassat koostuvat puunjalostusteollisuuden sivutuotteista sekä tähteistä. Tertiäärisiin biomassoihin viitataan usein myös kierrätyspuuna, sillä niihin lukeutuvat pääasiassa käytöstä poistettu puu tai puutuotteet. (Alakangas et al. 2016, 65-66)

Metsähakkeen tuotannossa käytetyt metsäbiomassan lähteet voidaan jakaa ainespuuhakkuun yhteydessä kerättyyn jäännösbiomassaan ja nuorten metsien harvennusten yhteydessä kerättyyn pienpuubiomassaan (Díaz-Yáñez et al. 2013, 564-565). Pienpuuhakkeen tuotannolla on usein metsänhoidollinen näkökulma, ja jäännösbiomassa voidaan nähdä luonnollisena osana teollisuuden käyttöön menevän ainespuun hankintaa (Pöyry 2006, 15). Pienpuubiomassaan kuuluvat nuorten metsien harvennuksen yhteydessä kerätty ranka- ja kokopuu, jotka ovat teollisuuden käyttöön kelpaamattomia. Kokopuu on karsimatonta pieniläpimittaista puuta ja

rankapuu karsittua kokopuuta. Ainespuuhakkuilta kertyvä jäännösbiomassa puolestaan koostuu hakkuutähteistä ja kannoista. Hakkuutähteet sisältävät ainespuun korjuun jälkeen metsään jäävät puuraaka-aineet, kuten oksat, latvat sekä muun hakkuualueille jäävän pienikokoisen puun. (Alakangas et al. 2016, 9-14) Lisäksi raaka-aineena käytetään ainespuuhakkuiden yhteydessä kerättyä, mutta teollisuuden jalostuskäyttöön kelpaamatonta järeämpää runkopuuta (Hakkila 2006b, 6-7). Pienpuu ja hakkuutähteet ovat metsähakkeen merkittävimmät raaka-aineet (kuva 1). Suomessa vuonna 2021 lämpö- ja voimalaitoksissa käytetystä metsähakkeesta 62 % oli pienpuusta, 28 % hakkuutähteistä, 7 % järeästä runkopuusta ja 3 % kannoista tuotettua. (Luonnonvarakeskus 2021a)



Kuva 1 Metsähakkeen kokonaiskäyttö raaka-ainejakeittain lämpö- ja voimalaitoksissa (Luonnonvarakeskus 2021a)

Metsähakkeen hankinta- ja tuotantopotentiaali on vahvasti riippuvainen erilaisista teknisistä, sosioekonomisista ja ympäristöllisistä tekijöistä. Pienpuun korjuupotentiaaliin vaikuttavat energiapuun tulo markkinoille, nuorten metsien harvennuspuun korjuutukien määrä ja rahoitusehdot. Vastaavasti jäännösbiomassasta tuotetun metsähakkeen tuotantopotentiaali on vahvasti riippuvainen markkinoiden suhdannevaihteluista ja teollisuuden puunkäytöstä. (Kuusinen & Ilvesniemi 2008, 8-9) Hakkuutähteiden ja kantojen korjuuseen vaikuttaa lisäksi metsänomistajien halukkuus hyväksyä korjuu, joka puolestaan on riippuvainen hinnasta, päästökaupan kehityksestä sekä EU:n ja kansallisen energia- ja ilmastopolitiikan linjauksista.

Yleisesti metsähakkeen hyödyntämismahdollisuuksiin vaikuttavat lisäksi verotuksen ja tukien, vaihtoehtoisten polttoaineiden hintojen ja logistiikan kehitys sekä saatavilla oleva tuotantoketjun urakoitsijoiden kapasiteetti ja hakkeen laatutekijät. (Antikainen et al. 2007, 20) Verotuksella voidaan rajoittaa vaihtoehtoisten fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja tukea suoraan biopolttoaineiden käyttöä. Lisäksi erilaiset tuet voivat kohdistua esimerkiksi uusiin laitosinvestointeihin. Teollisuuden investoinnit lisäävät hakkuutähdepohjaisen metsähakkeen tuotantopotentiaalia ja energialaitosinvestoinnit metsähakkeen kysyntää.

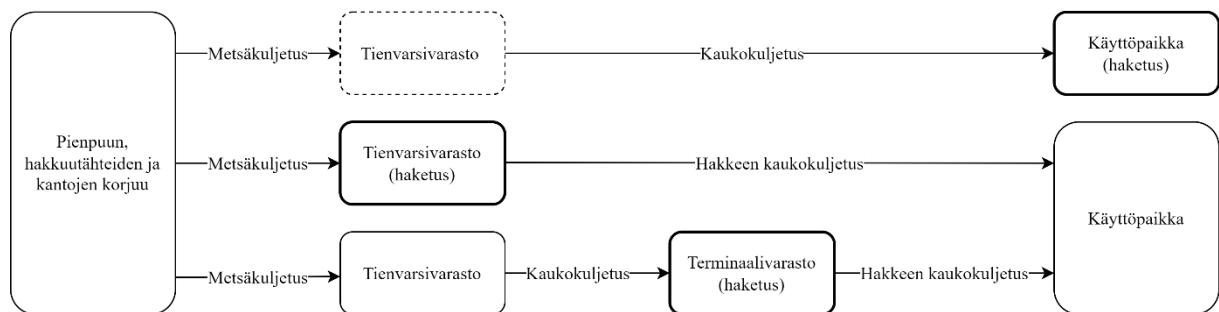
2.2 Toimitusketju

Toimitusketju määritellään useiden organisaatioiden muodostamaksi joukoksi, jotka osallistuvat tuotteiden, palveluiden, tiedon ja resurssien virtaan lähteestä asiakkaalle (Mentzer et al. 2001, 4). Beamon (1998, 281-282) kuvailee toimitusketjua integroiduksi prosessiksi, jossa useiden toimijoiden yhteistyön tavoitteena on hankkia raaka-aineita, muuntaa raaka-aineet lopputuotteiksi ja toimittaa lopputuotteet asiakkaille. Tälle ketjulle on tyypillistä eteenpäin kulkeva materiaalivirta ja taaksepäin suuntautuva informaatiovirta. Metsähakkeen toimitusketjut perustuvat suurten toimittajien järjestämiin tuotantoketjuihin, joissa urakoitsijoilta ostetaan korjuu-, kuljetus-, kuormaus- ja haketuspalveluita (Piirainen 2005). Alan suuret toimijat soveltavat niin sanottua laajavastuista yrittäjämallia (Nummelin et al. 2015, 6).

Metsähakkeen toimittaminen eroaa merkittävästi perinteisten tuotteiden maantietoimituksesta valmistajalta loppukäyttäjälle. Metsähakevarastot koostuvat pienistä laadullisesti monimuotoisista tarjontapisteistä väli- tai tienvarsivarastoilla, joista metsähake toimitetaan välisiirtona laajempaan terminaalivarastoon tai suoraan käyttöpaikalle. Tarjontapisteiden sijainti muuttuu jatkuvasti, kun tyhjennetyt pisteet korvataan uusilla. Lisäksi tarjontapisteiden saatavuuden ja kysynnän kausiluontoisuus asettaa vaatimuksia toimituslogistiikalle ja kalustolle sekä kasvattaa ketjun kustannuksia. (Väättäinen 2018, 10-11) Jakeluverkkojen rakentaminen on vaativaa useiden huomioon otettavien tekijöiden, kuten varastointisijaintien sekä taloudellisesti perusteltavien kuljetusetäisyyksien vuoksi (Kanzian et al. 2009, 114). Tarjontapisteiden sijainnin hajanaisuudesta johtuen autokuljetus on ainoa potentiaalinen kuljetustapa metsäbiomassalle. Lisäksi puupolttoaineen suhteellisen lyhyet toimitusmatkat ja

maantiekuljetuksen tarjoama joustavuus suosivat autokuljetusta. (Rentizelas et al. 2009, 888-889) Energiapuun keskimääräinen kuljetusmatka kotimaan liikenteessä on noin 64 kilometriä, joten voidaan puhua paikallisesta polttoaineesta. Kuljetusetäisyyteen vaikuttavat kysynnän ja tarjonnan alueelliset erot sekä haketuksen sijoittuminen tuotantoketjuun. (Tilastokeskus 2016; Venäläinen ja Poikela 2016, 11)

Metsäenergian toimitusketju koostuu yksinkertaistettuna korjuusta, metsäkuljetuksesta, varastoinnista, haketuksesta sekä kaukokuljetuksesta. Välsiirtoja varastopisteiden välillä esiintyy keskitettyyn haketukseen perustuvissa tuotantoketjuissa. Eri tuotantoketjujen väliset erot syntyvät toimitusketjun toimintojen järjestyksestä sekä kuljetetun metsäbiomassan muodosta. Valittu tuotantotapa vaikuttaa ketjun kustannuksiin, soveltuviin loppukäyttöpaikkoihin ja kuljetusetäisyyksiin. (Tapio Silva Oy 2017, 4-7) Metsähakkeen yleisimmät tuotantoketjut Suomessa esitetään kuvassa 2.



Kuva 2 Metsähakkeen tuotantoketjut

Metsähakkeen toimitusketju rakentuu haketuksen ympärille (kuva 2). Tuotantoketju korjuun jälkeen muodostuu pitkälti sen perusteella, miten haketus sijoittuu ketjuun, sillä tämä määrittää kuljetetun metsähakkeen muodon sekä ketjun erivaiheissa käytetyn kaluston riippuvuuden toisistaan. (Hakkila 2004, 18-23) Toimituslogistiikan kannalta ketjut voidaan haketustavan perusteella jakaa keskitetyn ja hajautetun haketuksen ketjuihin. Keskitetty haketus tapahtuu terminaalissa tai loppukäyttöpaikalla, kun taas hajautettu haketus perustuu tienvarsivarastoilla tai palstalla tapahtuvaan paikalliseen haketukseen. (Laitila et al. 2010, 34) Haketuksen sijasta käytetään myös termiä murskaus erityisesti keskitettyyn haketukseen perustuvissa tuotantoketjuissa, joissa hakkeen palakoko saadaan murskaamalla käyttöpaikan vaatimuksia vastaavaksi (Korpinen et al. 2019, 7).

2.2.1 Tienvarsihaketus

Tienvarsiketjussa kuljetus loppukäyttöpaikalle tapahtuu suoraan haketuksen jälkeen väli- eli tienvarsivarastosta (Strandström 2020, 9). Ennen haketusta metsäbiomassa kuljetetaan tienvarsivarastoon korjuupaikalta. Tienvarsihaketusketjuissa haketus ja kuljetus muodostavat ”kuuman ketjun”, mikä viittaa tuotantoketjun vaiheiden riippuvuuteen toisistaan ja tekee niiden rinnakkain tai limittäin suorittamisesta mahdotonta. (Hakkila 2004, 18-19) Käytännössä tämä aiheuttaa odotusaikoja ketjuun tienvarsivarastolla joko haketukseen käytetyn hakkurin tai kaukokuljetukseen käytetyn hakeauton osalta. Tienvarsihaketus soveltuu kaiken kokoisille loppukäyttöpaikoille ja kustannustehokkuutensa puolesta myös pitkille kuljetusetäisyyksille. Haketus suoritetaan suoraan kuljetuksen käyttöpaikalle tekevään ajoneuvoon, joten kuljetuskapasiteetti hyödynnetään täysmääräisesti. (Laitila et al. 2010, 34-38) Tienvarsihaketus on joustava ja vakiintunut tuotantoketju, jonka tehokkuutta rajoittavat kaluston kapasiteetti ja eri vaiheissa käytetyn kaluston riippuvuus toisistaan. Tienvarsivaraston on myös oltava riittävän suuri kattamaan haketuskaluston siirtokustannukset. (Routa et al. 2012, 605-607)

2.2.2 Terminaalihaketus

Terminaalihaketuksessa raaka-aine kuljetetaan ennen haketusta terminaaliin, joko suoraan korjuupaikalta tai välivaraston kautta. (Hakkila 2004, 19) Terminaaliketjussa haketus suoritetaan terminaalissa, mikä eliminoi työvaiheiden väliset odotusajat ja mahdollistaa kaluston korkean käyttöasteen. Keskitetty haketus ja suurten volyymien kautta saavutetut mittakaavaedut mahdollistavat hajautetun haketuksen menetelmiä matalammat haketuskuustannukset. Käsittelemättömän raaka-aineen kuljetus terminaalille voi kuitenkin nostaa terminaalihaketusketjun kokonaiskustannuksia ja rajoittaa kuljetuksen toimintasädettä. Syynä lisäkustannuksille ovat käsittelemättömän hakkeen matalaksi jäävät kuormakoot ja hakkeen ristiin kuljetus vaiheiden välillä. (Laitila et al. 2010, 34-37; Hakkila 2004, 19) Kuljetuksen kapasiteettia rajoittava tekijä onkin massan sijasta usein tilavuus (Ranta & Rinne 2006, 231-232). Lisäkustannuksia tienvarsiketjuun verrattuna aiheutuu myös hakkeen muusta käsittelystä terminaalissa, kuten kuormien purkamisesta ja lastauksesta. Terminaaliketju on taloudellinen, kun välisiirtoon käytetty kuljetusmatka välivarastolta tai palstalta on lyhyt ja varastojen koko pieni. (Poikela ja Venäläinen 2016, 12) Terminaaliketjussa saavutetaan myös

hyötyjä hakkeen laadunhallinnassa sekä hakkeen toimitusvarmuudessa. (Routa et al. 2012, 607) Terminaalit toimivat kausivaihtelua tasoittavina varmuusvarastoina talven ja kelirikkoajan rajoittaessa tienvarsivarastojen saatavuutta, mahdollistavat erilaatuisen hakkeiden sekoittamisen laadun kontrolloimiseksi ja soveltuvat kaiken kokoisille loppukäyttöpaikoille. (Laitila et al. 2010, 37)

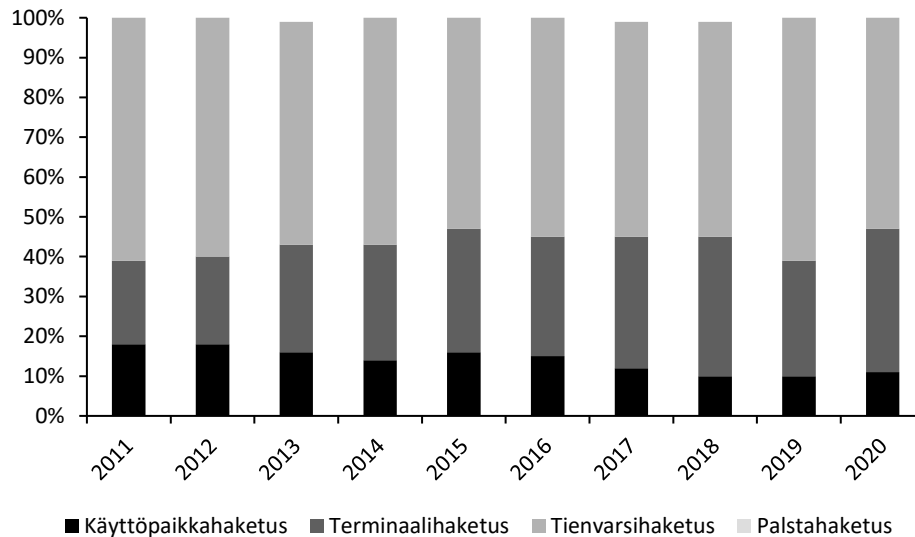
2.2.3 Käyttöpaikkahaketus

Käyttöpaikkahaketuksessa hakettamaton materiaali kuljetetaan suoraan käyttöpaikalle hakettavaksi. Käyttöpaikkaketjun käyttö rajoittuu vain suurille laitoksille haketuskaluston vaatimien korkeiden investointikustannusten vuoksi. Lisäksi tarjonnan ja metsähakevirran on oltava mahdollisimman suuri, jotta kuljetusetäisyydet eivät kasva liian pitkiksi ja mittakaavaedut hyödynnetään. Käyttöpaikkahaketusketju kärsii käsittelemättömän biomassan matalasta kuormakoosta vastaavasti kuin terminaaliketju. Käyttöpaikkahaketus on puolestaan lyhyillä toimitusetäisyyksillä kustannustehokkain tuotantoketju vähentäen kuljetus- ja haketusvaiheiden välistä riippuvuutta sekä vaaditun työvoiman määrää. Terminaaliketjua vastaavasti keskitetty haketus käyttöpaikalla mahdollistaa tehokkaamman hakkeen laadunhallinnan verrattuna hajautettuun haketukseen. (Routa et al. 2012, 607)

2.2.4 Tuotantoketjujen käyttö Suomessa

Suomessa valtaosa metsähakkeesta tuotetaan tienvarsi- ja terminaalihaketusketjuilla (kuva 3). Pienpuun ja hakkuutähteen tuotantoketjuissa käyttöpaikkahaketuksen osuus on vain 8 prosenttia. Valtaosa tuotannosta erityisesti hakkuutähteillä keskittyy tienvarsiketjuun. Puolestaan kantomurskeen tuotantoketjuissa käyttöpaikkamurskaus on yleisin tuotantoketju. Kaikkien raaka-ainejakeiden osalta tienvarsihaketus kattaa 61 %, terminaalihaketus 29 % ja käyttöpaikkahaketus 10 % käytetyistä tuotantoketjuista. (Luonnonvarakeskus 2020) Palstahaketukseen perustuvien tuotantoketjujen käyttö on laajamittaisessa tuotannossa Suomessa loppunut (Strandström 2020, 9-19). Käytetyn tuotantoketjun valinta riippuu raaka-ainejakeesta, kustannuksista, kuljetusetäisyydestä, korjuuoloista, tienvarsivarastotilasta, saatavilla olevasta kalustosta sekä lämpö- ja voimalaitosten käyttövolyymeista. Useiden

vaikuttavien tekijöiden vuoksi yksittäisen yleispätevän ketjun käyttö on tuskin koskaan mahdollista. (Kärhä 2011, 3408).

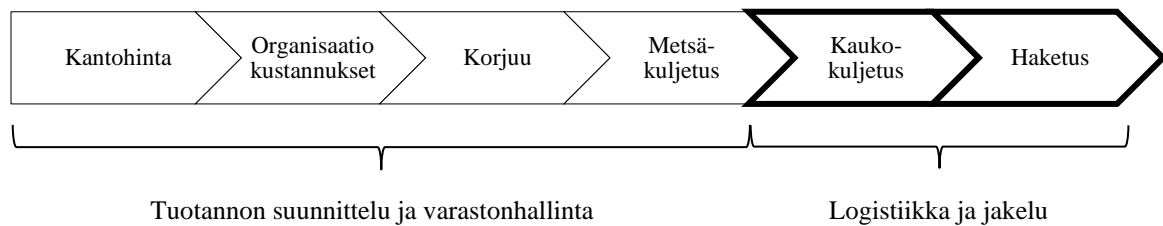


Kuva 3 Metsähakkeen haketustapojen käyttö Suomessa (Luonnonvarakeskus 2020)

2.3 Arvoketju ja kustannukset

Toimitusketjunhallinta viittaa toimitusketjun toimintojen koordinointiin ja hallintaan, jonka tavoitteena on asiakkaalle toimitetun arvon maksimointi alhaisemmilla ketjun kokonaiskustannuksilla. Arvoketjuajattelu on johtanut palveluiden ulkoistamiseen ja arvoketjun laajentumiseen yritysrajojen ulkopuolelle, minkä seurauksena yrityksen arvoketjun voidaan nähdä muodostuvan sen toimitusketjusta. (Christopher 2016, 2-11) Arvoketju jakaa yrityksen sen strategisesti merkittäviin toimintoihin ja pyrkii selittämään kustannusten käyttäytymisen sekä kilpailijoista erottautumisen keinot. Kilpailuetu syntyy näiden toimintojen toteuttamisesta kilpailijoita kustannustehokkaammin. (Porter 1985, 33-34) Toimitusketju voidaan jakaa kahteen integroituun prosessiin: (1) tuotannon suunnitteluun ja varastonhallintaan sekä (2) jakeluun ja logistiikkaan. Tuotannon suunnittelu ja varastonhallinta muodostuvat raaka-ainehankinnasta, valmistuksesta ja varastonhallinnasta. Logistiikka ja jakelu puolestaan viittaavat tapaan, jolla tuotteet toimitetaan varastosta asiakkaille, ja pitää sisällään varastojen noudon, kuljetuksen ja lopputuotteiden toimituksen hallinnan. (Beamon 1998, 282)

Ihalaisen ja Niskasen (2010, 6-9) esittelemässä arvoketjussa metsähakkeen käyttöpaikkahinnan muodostavat kantohinta sekä organisaatio-, korjuu-, metsäkuljetus-, kaukokuljetus- ja haketus kustannukset. Kustannusrakenne poikkeaa eri tuotantoketjujen ja jakeiden välillä. Arvoketju esitetään kuvassa 4, jossa tämän tutkimuksen rajaukset on korostettu. Käyttöpaikkahinnan muodostumiseen vaikuttavat leimikkotekijät sekä konekustannustekijät. Leimikkotekijät viittaavat hakattavaksi leimatun metsän ominaisuuksiin ja koostuvat leimikon koosta, metsäkuljetusetäisyydestä, kaukokuljetusetäisyydestä sekä terminaalin ja loppukäyttöpaikan välisestä etäisyydestä. Lisäksi raaka-ainejakeen määrittämiksi muuttuviksi tekijöiksi tunnistettiin puuston tilavuus, kertymä leimikolla ja kosteusprosentti. Konekustannustekijät tarkoittavat kalustosta aiheutuvia kustannuksia, jotka määrittyvät raaka-ainejakeen, tuotantoketjun sekä yleisen polttoaineiden hintatason perusteella. Toimitusketjun työkonoiden muuttuvista kustannuksista yli 80 prosenttia on polttoainekustannuksia ja siten suoraan verrannollisia käyttöaikaan tai -matkaan.



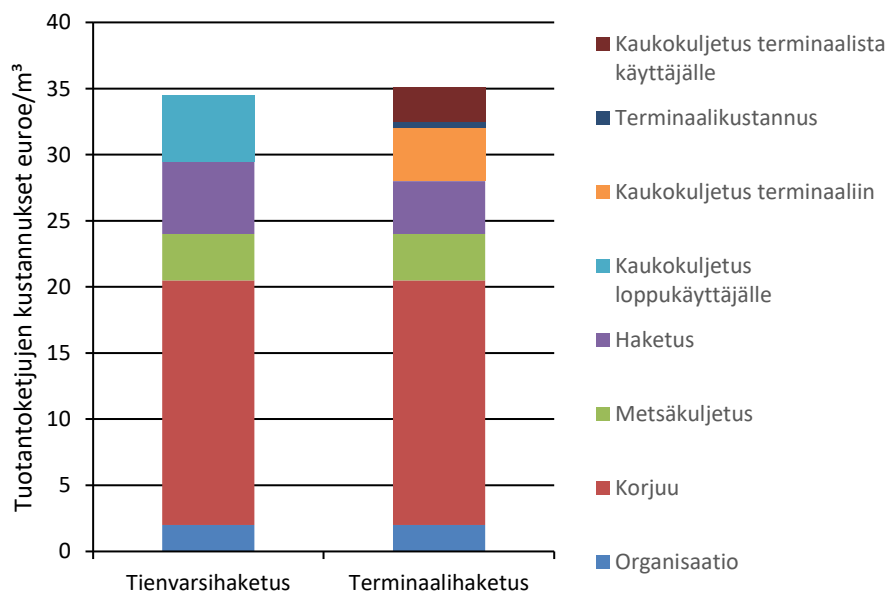
Kuva 4 Metsäenergian käyttöpaikkahinnan muodostuminen ja toimitusketjun toiminnot (Ihalainen ja Niskanen 2010, 6)

Pienpuun kantohinta perustuu yleisesti pinta-alaan tai energiapuumäärään. Hakkuutähteistä puolestaan maksetaan usein hakattuun ainespuukertymään sidottu hinta. (Ihalainen ja Niskanen 2010, 9) Organisaatio- tai yleiskustannusten on oletettu metsähakkeen kustannusrakennetta käsittelevissä tutkimuksissa toteutuvan yhtenevästi kaikilla tuotantoketjuilla ja raaka-ainejakeilla (Laitila et al. 2010, 66; Heikkilä et al. 2005, 37). Korjuu- ja metsäkuljetuskustannuksiin vaikuttavat leimikko- ja konekustannustekijät kuitenkin lukuun ottamatta kaukokuljetusetäisyyttä sekä käytettyä tuotantoketjua. Korjuuseen ja metsäkuljetukseen sidonnaisten leimikkotekijöiden vaikutus toimitusketjun kokonaiskustannuksiin on merkittävä, mutta tekijöihin voidaan käytännössä vaikuttaa vain leimikoiden hankintavaiheessa. Tässä työssä keskitytään metsähakkeen logistiikkaan ja

analysoitaviksi toimitusketjun toiminnoiksi rajautuvat siten metsäbiomassan varastointi, haketus ja kaukokuljetus. Tämä rajaa hankintavaiheessa määrittyvät leimikkotekijät huomioonotettavien kustannustekijöiden joukosta. Toimitusketjun kustannuksista keskitytään haketus- ja kaukokuljetuskustannuksiin.

2.4 Haketus- ja kuljetuskustannukset

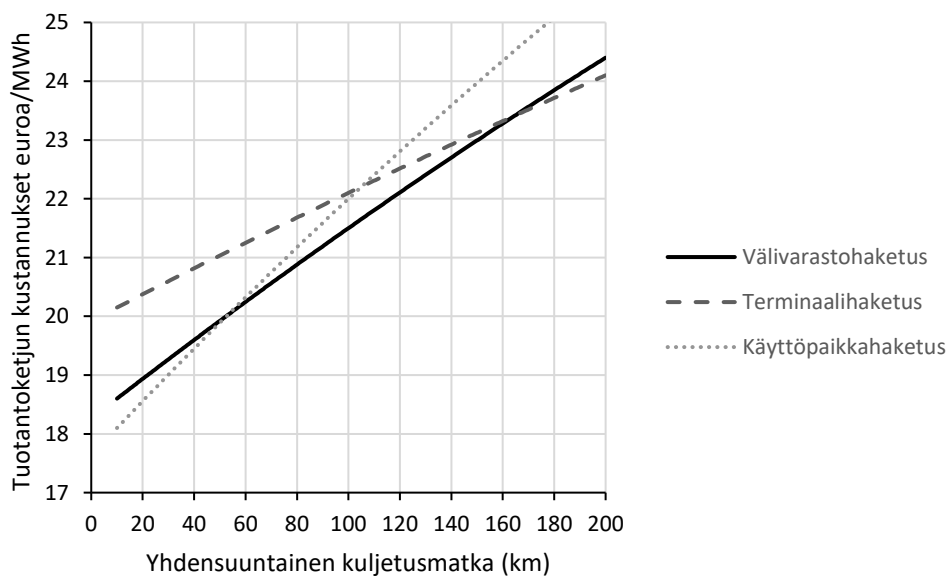
Haketuksen kustannukset vaihtelevat raaka-ainajakeittain haketustuottavuuden perusteella (Ihalainen ja Nissinen 2010, 14-15). Haketukseen ja kuljetukseen liittyvät myös kuorman tekoon ja purkuun liittyviä kustannuksia, jotka poikkeavat raaka-ainajakeen, kaluston sekä haketustavan mukaan. Terminaaliketju tuo mukanaan enemmän hakkeen käsittelyyn liittyviä kustannuksia. Tienvarsihaketukselle puolestaan on ominaista työmaiden välisiin siirtoihin käytetyn ajan suuri osuus kokonaiskustannuksista. Keskitetyn haketuksen tuotantoketjuissa hakkurin käyttöaste on parempi, ketjun odotusajat lyhyemmät ja yksikkökustannukset alhaisemmat. (Laitila & Väättäinen 2011, 108-117; Laitila et al. 2010, 37-64) Kuvassa 5 esitetään rankapuusta tuotetun metsähakkeen kustannusrakenne tienvarsi- ja terminaalihaketusketjuilla kaukokuljetusetäisyyden ollessa 50 kilometriä.



Kuva 5 Metsähakkeen kustannusrakenne tienvarsi- ja terminaalihaketusketjuissa (Heikkilä et al. 2005, 37)

Kuljetusetäisyys ja kaukokuljetus ovat tuotantoketjusta ja raaka-ainejakeesta riippumatta strategisia kustannustekijöitä metsähakkeen toimitusketjussa. Kaukokuljetuksen kustannuksiin, tehokkuuteen ja tuottavuuteen vaikuttavat muun muassa materiaalin kiinteä tilavuus, materiaalin kosteus, kuljetusetäisyys sekä käytetyn kaluston tekniset ominaisuudet. Kaukokuljetuksen suhteellista osuutta kokonaiskustannuksista nostaa erityisesti kuljetetun metsäbiomassan tiheys, jolla on suora vaikutus kuljetettuun energiamäärään. Hakkeen energiasisältö vaikuttaa merkittävästi sen kilpailukykyyn sekä arvoon, ja toimii metsäenergian maksuperusteena. (Ranta & Rinne 2006, 231-232; Ihalainen ja Nissinen 2010, 11-26; Hakkila 2006b, 11) Kuljetetun materiaalin tiheyteen vaikuttavat raaka-ainejae sekä käytetty tuotantoketju. Ketjujen välillä on eroa kuljetetun hakkeen muodossa sekä kuormaustekniikassa. Myös hakkeen kosteudella on merkittävä vaikutus kuljetustoimintaan, sillä korkea kosteuspiitoisuus madaltaa kuljetetun materiaalin energiatiheyttä ja lisää kuorman painoa. (Lähdevaara et al. 2010, 39-56)

Kuljetuskustannukset vaihtelevat Suomessa alueellisesti tarjonnan ja kuljetusetäisyyden perusteella (Lähdevaara et al. 2010, 39-56). Kaukokuljetusetäisyyden rooli metsähakkeen kokonaiskustannusten muodostumisessa on merkittävä kaikilla tuotantoketjuilla. Pienpuuhakkeen kokonaiskustannukset eri tuotantoketjuille toimitusetäisyyden suhteen kaukokuljetusetäisyyden terminaaliin ollessa 30 kilometriä esitetään kuvassa 6.

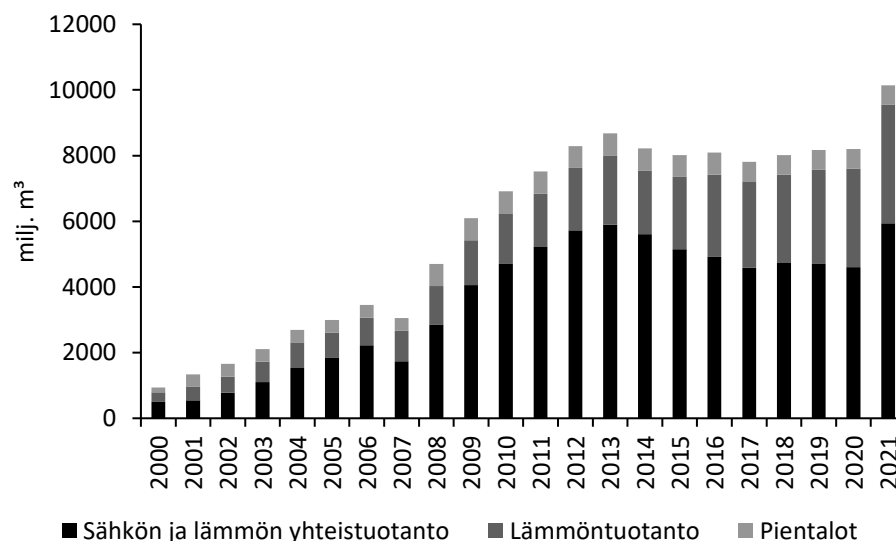


Kuva 6 Kokonaiskustannukset eri tuotantoketjuilla kuljetusmatkan suhteen (Rinne 2010, 82)

Etäisyyden vaikutus kokonaiskustannuksiin on erityisen suuri matalilla kuormatiheyksillä ja -tilavuuksilla sekä korkeilla kosteuspitoisuuksilla. Raaka-ainejakeista esimerkiksi hakkuutähteiden sekä kantojen kuormatiheys on alhaisempi kuin pienpuulla. Kuljetusmatkan kustannusvaikutus on siis sidottu myös käytettyyn raaka-aineeseen ja tuotantoketjuun. Kaukokuljetusetäisyyksien odotetaan nousevan tulevaisuudessa, sillä kasvavan kysynnän tyydyttäminen paikallisesta tarjonnasta vaikeutuu. Vastaavasti kysyntäpisteiden määrän ja maantieteellisen hajonnan voidaan odottaa kasvavan. Samalla myös logistiikkasuunnittelun rooli organisaatiossa kasvaa bioenergian kilpailukyvyyn kannalta. (Ihalainen ja Nissinen 2010, 5-28) Toimittajan näkökulmasta logistiikan kehittäminen keskittyy erityisesti kuljetusetäisyyksien minimoimiseen ja varastojen eli tarjonnan hallintaan. Luvussa 2.5 käsitellään tarkemmin varastoinnin vaikutusta metsähakkeen laatutekijöihin ja kustannuksiin.

2.5 Käyttö ja laatutekijät

Metsähakkeen suurimmat käyttäjät muodostuvat suurista energia- ja metsäteollisuusyrityksistä (kuva 7). Uusiutuvan energian kasvavan käytön myötä myös pienet ostajat ja niiden yhteenliittymät ovat yleistyneet. (Nummelin et al. 2015, 6)



Kuva 7 Metsähakkeen kokonaiskäyttö käyttäjäkohteittain (Luonnonvarakeskus 2021b)

2.5.1 Kilpailuetu

Metsähaketoimittajan kilpailuetuun vaikuttavat kustannustehokkuuden lisäksi lopputuotteen laatu ja jalostusarvo. Toimittajat pyrkivät täyttämään asiakkaan asettamat ehdot, ja suurten energia- ja lämpölaitosten kohdalla sopimukseen kirjatut polttoaineen laatuvaatimukset. Käyttäjien asettamat laatuvaatimukset vaihtelevat laitoksen koon, tuotantoprosessin monimutkaisuuden ja polttoaineelle asetettujen vaatimusten mukaan. Suurkäyttäjien laatuvaatimukset ovat usein matalampia ja polttoaineen käyttö joustavampaa. Metsäenergian maksuperusteena toimii toimitetun puun energiasisältö, joka on yhdessä kosteuspitoisuuden kanssa oleellinen laatukomponentti. Kilpailukykyisimmät yritykset erottautuvat toimitetun metsähakkeen toimitusvarmuudella, laadulla ja kohtuullisella hintakehityksellä. Energiantuottajalle korostuvat käyttöpaikkahinnan lisäksi tasa- ja korkealaatuisen polttoaineen merkitys. (Ikonen et al. 2013, 9-14) Yksiselitteistä laadun määrittämistä varten on laadittu puupolttoaineiden laatuohje (Alakangas & Impola 2013).

Metsäenergian hankintaketjujen osaamistarpeita kartoittaneessa tutkimuksessa ongelmakohtiksi energialaitoksen näkökulmasta tunnistettiin muun muassa metsähakkeen kosteus ja saatavuus (Autio 2009, 35-36). Nummelinin ja muiden selvityksessä (2015, 17-20) metsähakkeen toimittajien kilpailuedun lähteiksi tunnistettiin toimitusvarmuus ja laatu. Selvityksessä toimittajat puolestaan kokivat asiakastoimitusten haasteiksi erityisesti toimitusvarmuuden, laatuvaatimukset ja aikataulun. Toimintaolosuhteisiin vaikuttaviksi tekijöiksi tunnistettiin sää- ja maasto-olosuhteet, tiestön kunto, kelirikko ja toiminnan kausiluonteisuus. Toiminnan suurimmaksi riskiksi nostettiin valtion tukipolitiikan muutokset.

Energiapuun toimitusketjussa hallittavan tiedon määrä on suuri. Varastoinnin ja toimituslogistiikan kannalta tiedonhallinnassa korostuu oikea-aikaisuus (Seppänen et al. 2008, 33). Metsähake on toimitettava vaatimuksia vastaavalla laadulla oikea-aikaisesti ja tasaisesti. Samalla on pystyttävä järjestämään logistiikka kustannustehokkaasti kilpailukyvyyn parantamiseksi vaihtoehtoihin polttoaineisiin nähden. Logistiikan näkökulmasta laatuun ja kilpailukykyyn voidaan vaikuttaa varastoinnin ja kuljetusten suunnittelulla.

2.5.2 Kausivaihtelu

Kausivaihtelu on merkittävästi metsähakkeen laatutekijöihin vaikuttava ilmiö. Hakkeen toimittajan tavoitteena on mahdollisimman tasainen ja tehokas puuvirta ympärivuotisesti asiakaslaitosten kysynnän mukaan. Ilmasto ja vallitsevat sääolosuhteet aiheuttavat kuitenkin voimakasta kausivaihtelua ja epävarmuutta metsähakkeen kysyntään. Valtaosa metsähakkeen käytöstä sijoittuu yhteistuotantolaitoksiin, joiden polttoaineen käyttö palvelee pääosin kaukolämmön ja teollisuuden prosessihöyryn tuotantoa. Kausivaihtelun voimakkuutta kuvastaa tammikuun noin viisinkertainen kaukolämmön kysyntä verrattuna heinäkuun kysyntään. (Korpinen 2019, 9-11; Luonnonvarakeskus 2021b)

Tarjonnan kannalta kausivaihtelun vaikutukset eivät ole yhtä voimakkaita, mutta sen vaikutukset havaitaan energiapuun korjuussa sekä varastoinnissa. Tarjontaan vaikuttavat varastojen toimituskelpoisuuden kautta varaston ikä ja arvioitu laatu sekä kausivaihtelusta riippuvainen tiestön kantavuus. Erityisesti tienvarsivarastojen saatavuus voi olla rajoitettua kelirikon aikaan. (Korpinen 2019, 9-11) Kausivarastointi aiheuttaa lisäksi puun jalostusarvon alenemista ja pääomakustannuksia. Kaukokuljetuksessa vaikutus näkyy lisäkustannuksina esimerkiksi alivarastotilanteessa, jonka seurauksena kuljetusetäisyydet kasvavat. Kausivaihtelun suurimmat kustannusvaikutukset havaitaan jalostusarvonmenetyksessä ja lisäkuljetusmatkassa. Toimitusketjussa kausivaihtelu johtaa lisäksi hakkuumäärien sekä kaluston ja henkilöstöressurssien käytön vaihtelevuuteen eri vuodenaikoina, mikä vaikeuttaa toiminnan suunnittelua. (Venäläinen et al. 2018, 24-38)

2.5.3 Kosteuspitoisuus

Metsähakkeen tärkein laatuominaisuus on kosteuspitoisuus (Alakangas et al. 2016, 67-68). Hakkeen tehollinen lämpöarvo, energiatiheys ja polton hyötysuhde ovat sidonnaisia puun kosteuteen. Kosteuspitoisuuden kasvaessa myös lämpöarvo laskee lineaarisesti. Energiatiheys reagoi kosteuteen vastaavasti, mutta lasku on voimakkaampaa vasta suurilla kosteuspitoisuuksilla. Kausivaihtelun vaikutukset havaitaan myös muissa hakkeen laatutekijöissä. Energiapuun kosteus talvella on suurempi kuin kesällä, sillä se vaihtelee sademäärien lisäksi ilmakehän kosteuden mukaan. (Ikonen et al. 2013, 15-18) Toiminta on siis

kosteuden kannalta kannattavinta kesällä, mutta kysynnän kausivaihtelu pakottaa talvella kosteamman puun käyttöön. Energiämäärä toimii maksuperusteena niin asiakkaalle kuin toimitusketjun muille toimijoille, minkä seurauksena energiapuun kosteus on laatutekijänä hintoihin sidottu.

Puun kosteusprosentti on pääsääntöisesti liian korkea energiakäyttöön välittömästi korjuun jälkeen. Kosteus vaihtelee puulajin, raaka-ainejakeen sekä korjuuajankohdan mukaan. Puun kosteutta voidaan alentaa varastoinnin aikana, mutta kääntopuolena pitkäaikainen varastointi aiheuttaa energiapuun jalostusarvon alenemista. (Ikonen et al. 2013, 15-18) Kosteus on saatava mahdollisimman matalalle tasolle ennen haketusta ja lähtökohtana käytetään yleisesti yhden kesän yli kuivumista. Tätä pidemmissä varastointiajoissa havaitaan jakeiden välillä eroja jalostusarvon kehityksessä. (Rusanen 2013, 13-14)

Metsähakkeella jalostusarvon aleneminen havaitaan kuiva-ainetappioina, jotka aiheuttavat merkittäviä lisäkustannuksia. Esimerkiksi vuoden varastoinnin jälkeen menetetty energiasisältö hakkuutähteillä on keskimäärin noin 25 % ja rankapuulla 6 %. Kuiva-ainetappiot nostavat hankitun puun yksikkökustannusta energiasisällön alentuessa hankintahetkeen verrattuna. Logistiikkasuunnittelun näkökulmasta kuiva-aineen mittatappioiden alentamiseen pyritään varaston kiertoaikoja nopeuttamalla ja varastojen ajojärjestystä valvomalla, mihin vaikuttavat myös jaekohtaiset ominaisuudet. (Neova Oy 2017) Korkeiden kuiva-ainetappioiden vuoksi hakkuutähteiden varastointiajat tulisi pitää lyhyimpinä ja pienpuidenkin korkeintaan kahdessa vuodessa. Kantojen pitkäaikainen varastointi ei aiheuta yhtä suuria tappioita, mutta pitkäaikainen pääoman sitominen ei ole suositeltavaa taloudellisesti. (Rusanen 2013, 13-14)

3 LINEAARINEN OHJELMOINTI

Organisaation koon kasvaessa ja toiminnan laajentuessa yksittäisten toimintojen tavoitteet saattavat ajautua ristiriitaan ja vaikuttaa kokonaisuutta heikentävällä tavalla. Tämä on osittain seurausta toimintojen erikoistumisen, ja autonomian tason ja organisaatioiden kompleksisuuden kasvusta, jolloin kaikkien resurssien kohdentaminen kokonaisuuden kannalta parhaalla tavalla vaikeutuu. Operaatioanalyysin tavoitteena on hyödyntää kehittyneitä analyyttisiä menetelmiä tukemaan päätöksentekoa ja ohjaamaan toimintaa. Operaatioanalyysi pyrkii yleisesti löytämään parhaan mahdollisen ratkaisun eli optimiratkaisun ja käsittelee ongelmia laajasta näkökulmasta huomioiden yksittäisten komponenttien väliset suhteet. Sen tavoitteena on kuitenkin organisaation käytännön hallinnan kehittäminen, joten menestyksekkäässä tutkimuksessa on tuloksista muodostettava ymmärrettäviä ja positiivisia johtopäätöksiä päätöksentekijöille. Operaatioanalyysi on luovaa tieteellistä tutkimusta toiminnan perusominaisuuksista. (Hillier & Lieberman 2001, 1-3) Operaatioanalyysille olennaista on ongelman mallinnus aiemmin tunnistamattomien uusien toimintamallien ehdottamiseksi päätöksentekijöille. Lisäksi mallintaminen voi auttaa hahmottamaan uusia vuorovaikutussuhteita ja toimia työkaluna skenaarioanalyysissä. (Williams 2013, 3-4)

Operaatioanalyysin merkittävin menetelmä on lineaarinen ohjelmointi, jonka avulla asetetulle kohdefunktiolle etsitään optimaalinen ratkaisu ongelmalle asetettujen rajoitteiden puitteissa. Nimensä mukaisesti lineaarisen ohjelmoinnin mallit perustuvat lineaariseen kohdefunktioon ja rajoitteisiin. Lineaarisen ohjelmoinnin ongelmien ratkaisu perustuu algoritmeihin, joita hyödynnetään toistuvasti ongelmaan jokaisen iteraation siirtyessä lähemmäs parasta mahdollista ratkaisua. Algoritminen ratkaisu on usein työlästä, minkä vuoksi niiden ratkaisu on suoritettava tietokoneella. (Taha 2007, 4-5) Optimointiongelman ratkaiseminen voidaan jakaa viiteen päävaiheeseen:

1. Ongelman määrittely
2. Mallin rakentaminen
3. Mallin ratkaiseminen
4. Mallin validointi
5. Ratkaisun implementointi. (Taha 2007, 8-9; Hillier & Lieberman 2001, 7-22)

Ongelman määrittely vaatii ongelman laajuuden määrittämistä. Tavoitteena on tunnistaa ongelman kolme pääelementtiä: (1) kuvaus päätösvaihtoehdoista, (2) tutkimuksen tavoite sekä (3) mallinnetun järjestelmän toiminnan rajoitukset. Mallin rakentaminen vaatii määritellyn ongelman kääntämistä matemaattisiksi suhteiksi ja esittämistä lineaarisilla funktioilla. Mallin ratkaisu on vaiheista yksinkertaisin, sillä se edellyttää tarkkaan määriteltyjen optimointialgoritmien käyttöä. Mallin validoinnissa tarkistetaan toimiiko malli halutulla tavalla, eli ennakoiko se tarpeenmukaisesti mallinnetun järjestelmän käytöstä ja ovatko tulokset helposti selitettävissä. Yleisesti mallin voidaan sanoa toimivan halutulla tavalla, jos se toistaa kohtuullisesti menneet tapahtumat, kun syöteenä käytetään historiallista dataa. Optimointimallin käyttöönottoon kuuluu mallin antamien tulosten muuntaminen ymmärrettäviksi toimintaohjeiksi mallinnetun järjestelmän käyttöön. Operaatioanalyysin ratkaisujen tulee aina huomioida myös ihmisten käytös ongelmaa mallintaessa. (Taha 2007, 8-9)

3.1 Lineaarisen ohjelmoinnin perusoletukset

Lineaarisen optimoinnin ongelmia tulee usein yksinkertaistaa perusoletusten kautta, jotta malli on hallittavissa ja käytännöllinen. Liian yksityiskohtaisesti määritelty malli voi hankaloittaa ongelman analysointia ja rajoittaa tulosten hyödynnettävyyttä. Lineaarisen optimointiongelman mallintaminen edellyttää neljän perusoletuksen täyttymisen. Oletukset ovat seuraavat:

1. **Verrannollisuus:** Jokaisen muuttujan vaikutus kohdefunktion arvoon ja rajoitteisiin on suoraan verrannollinen kyseisen muuttujan arvoon. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kaikki mallin suhteet pysyvät vakioina.
2. **Lisättävyys:** Jokaisen muuttujan arvon vaikutus kohdefunktion arvoon ja rajoitteisiin on riippumaton muiden muuttujien arvoista.
3. **Jatkuvuus:** Muuttujat ovat jatkuvia, eli ne voivat saada minkä tahansa arvon ongelman rajoitteiden puitteissa.
4. **Varmuus:** Mallin parametrien arvojen oletetaan olevan tunnettuja vakioita.

Todellisuudessa on yleistä, etteivät kaikki oletukset täyty täydellisesti. Tämä pätee erityisesti varmuusoletukseen, sillä parametrien arvot ovat usein vain arvioiden tai arvausten tuloksia. Herkkyysanalyysin suorittaminen osana mallin validointia on usein välttämätöntä

kompensoimaan tämän oletuksen rikkomista. Oletusten toteutumisen tutkiminen kuitenkin auttaa ymmärtämään poikkeavuuksien suuruutta ja optimointimallien käytettävyyttä ongelman ratkaisemiseksi. (Hillier & Lieberman 2001, 33-43; Winston & Goldberg 2004, 53-54)

3.2 Käsitteet ja määrittely

Lineaarinen optimointimalli muodostuu kolmesta perusosasta: (1) päätösmuuttujista, (2) optimoitavasta tavoitteesta ja (3) rajoitteista, jotka ratkaisun täytyy tyydyttää (Taha 2007, 12). Lineaaristen optimointiongelmien yleismuoto muodostuu vastaavasti päätösmuuttujista, kohdefunktiosta ja rajoitteista. Lineaarisen optimoinnin ongelman yleinen muoto on seuraava:

$$\text{Maksimoi } Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n,$$

tyydyttäen

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2$$

⋮

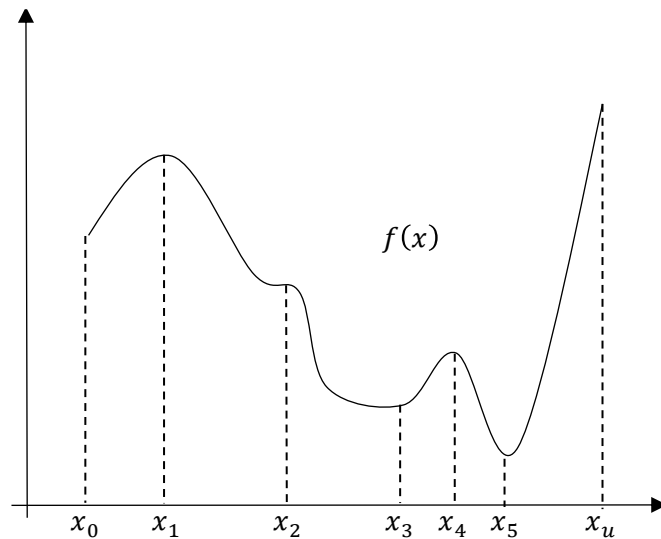
$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m$$

ja

$$x_1 \geq 0, \quad x_2 \geq 0, \quad \dots, \quad x_n \geq 0 \quad (1)$$

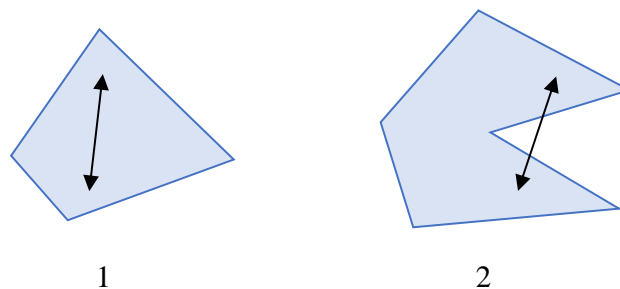
Maksimoinnin kohteena olevaa funktio, eli kohdefunktio, määrittää optimoinnin tavoitteen ja on riippuvainen päätösmuuttujien arvoista. Kaavan 1 yleismuodosta poiketen optimointimallin tavoitteena voi olla myös kohdefunktion minimointi. Päätösmuuttujat kuvailevat mahdollisimman tarkasti mallinnetussa järjestelmässä tehtäviä päätöksiä. Rajoitteet määrittävät kohdefunktion maksimoinnille ehdot, rajoitukset ja vaatimukset. Rajoitteet määritellään epäyhtälöinä ja yhtälöinä. Rajoitteet voivat olla niin sanottuja toiminnallisia rajoitteita tai päätösmuuttujien arvoja rajoittavia merkkirajoitteita. (Hillier & Lieberman 2001, 31-33) Sitovan rajoitteen molemmat puolet ovat yhtä suuret, kun optimaalisen ratkaisun muuttujien arvot sijoitetaan rajoitteeseen. Siten sitovia rajoitteita muuttamalla myös optimaalinen ratkaisu muuttuu. (Winston & Goldberg 2004, 58) Kuvassa 8 esitetään yhden muuttujan funktion käyttäytymistä eri arvoilla. Funktiolla on useita ääriarvoja eli lokaaleja optimeita, joista vain yksi on funktion globaali optimi. Funktion globaali maksimi on x_u ja globaali minimi x_s . Muut

arvot ovat lokaaleja eli paikallisia optimeita. (Haataja 2004, 51-53) Lineaarinen ohjelmointi luetaan globaaliksi deterministiseksi optimointimenetelmäksi, koska laajoihinkin ongelmiin löydetään varmuudella globaali optimi äärellisessä ajassa



Kuva 8 Esimerkki funktion $f(x)$ käyttäytymisestä ja useista ääriarvoista (Haataja 2004, 52)

Lineaarisen optimoinnin ratkaisu tarkoittaa arvojen asettamista päätösmuuttujille. Kaikki rajoitteet tyydyttävää ratkaisua kutsutaan käyväksi ratkaisuksi. Ongelmalle asetetut rajoitteet määrittelevät kohdefunktion mahdollisten ratkaisujen alueen eli käyvän alueen. Optimoinnissa käyvän alueen pisteistä etsitään paras, joka maksimoinnissa on kohdefunktion suurimman arvon saavuttava piste ja minimoinnissa pienimmän arvon saavuttava piste. (Hillier & Lieberman 2001, 33-35) Optimointiongelman käypää aluetta eli ratkaisujoukkoa kuvaa konveksisuus (kuva 9).



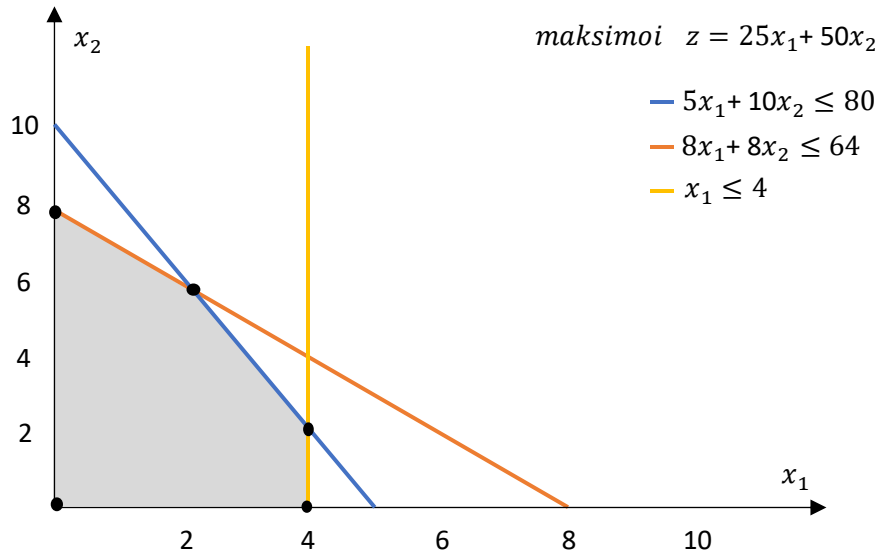
Kuva 9 Konvekksi joukko (1) ja ei-konvekksi joukko (2)

Ratkaisujoukko voi olla joko konvekksi tai ei-konvekksi. Lineaarisen ohjelmoinnin ratkaisujoukko on aina konvekksi, jolloin voidaan taata löydetyn paikallisen optimin olevan koko ongelman globaali optimi (Hillier & Lieberman 2001, 663). Kuvan 9 mukaisesti konveksin joukon minkä tahansa kahden pisteen välille piirretty jana pysyy kokonaisuudessa joukon rajojen sisäpuolella. Konveksin joukon ääripiste tarkoittaa pistettä, joka on päätepisteenä kaikille pisteen kautta piirretyille joukon rajojen sisäpuolella pysyville janoille. Ääripisteitä kutsutaan myös kulmapisteiksi tilanteessa, jossa käypä alue on muodoltaan monikulmio. Kuvan 9 konveksin joukon ääripisteitä ovat monikulmion kärjet. Lineaarisen optimointitehtävän globaali optimi löytyy aina käyvän alueen kulmapisteestä, jos ongelmalle on olemassa optimiratkaisu. (Winston & Goldberg 2004, 59) Kulmapisteet ovat aina rajoitteiden leikkauspisteessä, minkä seurauksena kulmapisteiden määrä kasvaa nopeasti päätösmuuttujien ja rajoitteiden määrän kasvaessa. Muuttujien määrän kasvaessa käypä alue on konvekksi monitahokas. Lineaarilla optimointiongelmillä voi olla myös useita optimiratkaisuja tai ei lainkaan optimiratkaisua. Optimaalisia ratkaisuja ei löydetä, jos käypä alue on tyhjä tai määritelty optimointiongelma on rajoittamaton. Ongelman käypä alue on tyhjä, kun määritellyt rajoitukset ovat keskenään ristiriidassa. Rajoittamattoman ongelman kohdefunktio saa mielivaltaisen suuria arvoja, mikä viittaa usein virheelliseen määrittelyyn. (Winston & Goldberg 2004, 63-67; Williams 2013, 103-104)

3.3 Ratkaisualgoritmi

Yleisin lineaarisen ohjelmoinnin ongelmien ratkaisualgoritmi on George Dantzigin vuonna 1947 kehittämä simplex-menetelmä. Simplex on tehokas algoritmi lineaarisen ohjelmoinnin ongelmien ratkaisemiseen, joka kiihdytti lineaarisen ohjelmoinnin käyttöä operaatioanalyysissä. (Winston & Goldberg 2004, 49; Dantzig 1963, 1-2) Menetelmä on algebrallinen, mutta sen taustalla olevat konseptit ovat geometrisiä, ja niiden ymmärtäminen selittää intuitiivisesti algoritmin toimintaa ja tehokkuutta. (Hillier & Lieberman 2001, 109) Simplex-menetelmä on iteroiva algoritmi, joka keskittyy käyvän alueen kulmapisteisiin (kuva 10). Optimaalisen ratkaisun löytäminen edellyttää parhaan kulmapisteen määrittämistä, mikä yksinkertaistaa ratkaisua vähentäen kantaratkaisujen määrää merkittävästi. Simplex-menetelmä mahdollistaa optimiratkaisun löytämisen äärellisellä määrällä askelia. (Hillier & Lieberman 2001, 113-114) Vaikka useita vaihtoehtoisia menetelmiä on esitelty, simplex-algoritmi on yhä

tehokkain ja käytetyin ratkaisumenetelmä yleisille lineaarisen optimoinnin ongelmille (Singiresu 2009, 119-120).



Kuva 10 Lineaarisen optimointiongelman kulma- eli ääripisteet ja käypä alue

Kuvassa 10 esitetään kahden muuttujan optimointiongelman käypä alue sekä kulmapisteet. Kahden muuttujan ongelma mahdollistaa ratkaisun geometrinen ominaisuuksien kuvaamisen. Käypää aluetta rajoittavat kolme lineaarista rajoitetta sekä reunaehtona päätösmuuttujien ei-negatiivisuus rajoitteet. Simplex-menetelmän aloituspisteeksi eli alustavaksi kantaratkaisuksi valitaan jokin käyvän alueen kulmapisteistä. Jos kohdefunktion arvoa voidaan parantaa liikkumalla käyvän alueen reunaa pitkin, ei nykyinen kantaratkaisu ole optimaalinen. Algoritmi etenee geometrisesti ajateltuna viereiseen kulmapisteeseen alustavasta kantaratkaisusta, sillä laskennallisesti tiedon kerääminen seuraavasta kulmapisteestä on tehokas tapa iteroida. Vierekkäisen kulmapisteen valinta perustuu kohdefunktion arvoa nopeimmin parantavan päätösmuuttujan tunnistamiseen ja sen akselin suuntaan liikkumiseen. Mikäli mikään viereisten kulmapisteiden suunnista ei muuta kohdefunktion arvoa positiivisesti, on nykyinen kulmapiste ongelman optimaalinen ratkaisu. (Hillier & Lieberman 2001, 113-114) Algoritmin toiminta vaatii yhden muuttujan arvon muuttamista kerrallaan (Taha 2007, 90-91). Simplex-menetelmä voidaan yksinkertaistaa kolmeen vaiheeseen:

1. Muodosta alustava kantaratkaisu.
2. Määritä onko nykyinen kantaratkaisu ongelman optimaalinen ratkaisu. Etsi seuraava kantaratkaisu, joka parantaa kohdefunktion arvoa.
3. Toista vaihetta kaksi, kunnes ratkaisua ei ole mahdollista parantaa. (Vanderbei 2002, 13-14; Winston & Goldberg 2004, 137)

Algebrallisesti algoritmin ratkaisu perustuu Gaussin eliminointiin, ja lähtökohtana käytetään geometrisesta tulkinnasta poiketen optimointiongelman standardimuotoa, joka saavutetaan muuttamalla kaikki muuttujat positiivisiksi ja epäyhtälörajoitteet vastaaviksi yhtälörajoitteiksi. (Winston & Goldberg 2004, 127-130) Valtaosassa lineaarisen optimoinnin ongelmista päätösmuuttujat esittävät fyysisiä tekijöitä, jolloin päätösmuuttujien arvot rajataan ei-negatiivisiin arvoihin (Singiresu 2009, 122-123). Ongelman kuvaamisessa standardimuodossa hyödynnetään epäyhtälömerkin suunnasta riippuen ali- tai ylijäämämuuttujia, jotka kuvaavat epäyhtälön puolien välistä erotusta. Ali- ja ylijäämä muuttujien arvojen tulee olla ei-negatiivisia, jotta ne vastaavat alkuperäisiä epäyhtälöinä esitettyjä rajoitteita. (Vanderbei 2002, 13-14) Ali- ja ylijäämämuuttujiin viitataan myös slack-muuttujina (Haataja 2004, 76-77). Kuvassa 10 esitelty optimointiongelma voidaan siten esittää standardimuodossa hyödyntäen positiivisia slack-muuttujia w_i seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 \text{maksimoi } z &= 25x_1 + 50x_2 \\
 \text{tyydyttäen } w_1 &= 80 - 5x_1 - 10x_2 \\
 w_2 &= 64 - 8x_1 - 8x_2 \\
 w_3 &= 4 - x_1 \\
 x_1, x_2, w_1, w_2, w_3 &\geq 0
 \end{aligned} \tag{2}$$

Simplex-menetelmä edellyttää ongelman muuttamista kanoniseen muotoon, jossa kaavat ovat lineaarisesti riippuvaisia. Kanonisessa muodossa kantamuuttujiksi viitataan muuttujilla, jotka esiintyvät ainoastaan yhdessä yhtälössä. Myös slack-muuttujat voivat toimia kaavan 2 mukaisessa ongelmassa kantamuuttujina. (Winston & Goldberg 2004, 141-142; Singiresu 2009, 133-134) Kaavan 2 standardimuotoisen yhtälön kanonisessa muodossa kantamuuttujiksi havaitaan z , w_1 , w_2 ja w_3 , kun ongelman alkukantaratkaisuna päätösmuuttujat ja kohdefunktio saavat arvon nolla.

Lineaarista optimointiongelmaa vastaavan yhtälöryhmän käypät kantaratkaisut vastaavat käyvän alueen ääripisteitä ja tyydyttävät kaavan 2 ei-negatiivisuus-ehdot. Jos ongelma koostuu m muuttujasta ja n rajoitteesta, kantaratkaisujen maksimilukumäärä on $\binom{m}{n}$ ja optimaalinen ratkaisu löytyy tästä joukosta. Siten globaali optimi löydetään äärellisessä ajassa ja enintään $\binom{m}{n}$ iteraatiossa simplex-menetelmällä. Todellisuudessa algoritmin on havainnointu toimivan tehokkaasti ja saavuttavan globaalin optimin alle $3m$ kantaratkaisun tarkastelun jälkeen. (Winston & Goldberg 2004, 130-138)

Kantaratkaisujen laskeminen perustuu $(n-m):n$ nollamuuttujan valintaan ja yhtälöryhmän ratkaisemiseen jäljelle jäävien $m:n$ kantamuuttujan suhteen. Nolla- eli ei-kantamuuttujat viittaavat muuttujiin, joiden arvoksi asetetaan nolla. (Winston & Goldberg 2004, 130-138)

Kantaratkaisujen sanotaan olevan vierekkäiset, kun kahden kantaratkaisun nollamuuttujien joukoissa on $m-1$ yhteistä muuttujaa. Kantaratkaisun optimaalisuuden määrittämiseksi etsitään viereisiä kantaratkaisuja, joissa kohdefunktion arvo on parempi. Käytännössä tämä toteutetaan tutkimalla, voiko kohdefunktion arvoa parantaa kasvattamalla jonkin ei-kantamuuttujan arvo nolasta muiden nollamuuttujien pysyessä ennallaan. Uudeksi kantamuuttujaksi valitaan yleisesti muuttuja, jonka kohdefunktion kertoimen itseisarvo on suurin eli kohdefunktio muuttuu positiivisesti jyrkimmin kyseisen muuttujan suuntaan. (Winston & Goldberg 2004, 140-147)

Yhden simplex-algoritmin iteraation aikana yksi muuttuja siirtyy kantamuuttujaksi, minkä lisäksi yksi muuttuja poistuu kantamuuttujien joukosta. Iteraatio kuvaa siten siirtymistä viereiseen parempaan kantaratkaisuun. Kannasta poistuva muuttuja valitaan säilyttämään nykyisten kantamuuttujien ei-negatiivisuus. Jos maksimointiongelmassa yhdelläkään ei-kantamuuttujalla ei ole positiivista kerrointa, on nykyinen ratkaisu optimaalinen. Uuden kantamuuttujan määrittämistä seuraa maksimointiongelmassa sen arvon kasvattaminen nolasta, mikä muuttaa muiden riippuvaisten kantamuuttujien arvoja. (Vanderbei 2013, 16-19) Uuden kantamuuttujan suurin mahdollinen arvo, joka pitää kaikki nykyiset kantamuuttujat ei-negatiivisina ja säilyttää ratkaisun käypyyden määritetään ns. suhdetestillä. Suhdetestin avulla etsitään ensimmäisenä nolaaan putoava kantamuuttuja, joka siirtyy iteraation päätteeksi ei-kantamuuttujien joukkoon. Suhdetesti suoritetaan jokaiselle rajoitteelle standardimuodossa ja

pienimmän suhteen saavuttanut rajoite määrittää kannasta poistuvan muuttuja sekä uuden kantamuuttujan suurimman mahdollisen arvon. (Winston & Goldberg 2004, 142-147; Hillier & Lieberman 2001, 120-123) Simplex-menetelmän kunkin iteraation alussa yhtälöt uudelleenkirjoitetaan alustavaa kantaratkaisua vastaavaan muotoon, jossa nykyiset kantamuuttujat ilmaistaan ei-kantamuuttujien funktiona. Edellä kuvaillut säännöt toimivat siten ratkaisun optimaalisuus- ja käyppyysehtoina. (Vanderbei 2013, 16-19)

3.4 Ratkaisun analysointi ja mallin validointi

Lineaarisen optimointiongelman analysointiin liittyviä olennaisia prosesseja ovat mallin validointi ja postoptimaalinen analyysi. Riippuen lähteestä näiden prosessien luokittelu vaihtelee ja ne nivoutuvatkin usein kirjallisuudessa osaksi yhtä laajaa prosessia. (Greenberg 1993, 65-66; Hillier & Lieberman 2001, 152-153) Validointiin ja postoptimaaliseen analysointiin kuuluvat tehtävät pyrkivät varmistamaan mallin luotettavan toiminnan eri näkökulmista. Validoinnilla pyritään määrittämään kuinka tarkasti malli kuvaa mallinnettua järjestelmää ja palvelee aiottua käyttötarkoitusta. Validointi voidaan nähdä mallin jatkuvana testaamisena ja kehittämisenä, jonka tavoite on parantaa mallin ratkaisun luotettavuutta (McCarl & Apland 1986, 156; Hillier & Lieberman 2001, 16-17). Validointi voidaan myös lukea osaksi postoptimaalista analyysia, joka suoritetaan, kun ongelmaan on löydetty käypä optimaalinen ratkaisu. Postoptimaalinen analyysi keskittyy pääasiassa tutkimaan mallin ratkaisun herkkyyttä ja käyttäytymistä, kun mallin oletuksia muutetaan. (Hillier & Lieberman 2001, 152-153)

3.4.1 Validointi

Mallin validointi on tärkeä osa empiiristä taloudellista analyysia. Mallia ei voida varmuudella hyödyntää, jos sitä ei todeta päteväksi kuvaukseksi mallinnetusta järjestelmästä tai ongelmasta. (McCarl & Apland 1986, 155-156) Ongelman optimaalisen ratkaisun löytymisen varmistamiseen ja käyvän ratkaisun mahdollistamiseen viitataan virheidenkorjaamisena. Virheidenkorjaaminen tarkoittaa käytännössä mallin muokkaamista siihen pisteeseen, jossa optimaalinen ratkaisu ongelmaan voidaan löytää, ja se on tarpeellista, kun mallissa havaitaan ”mekaaninen virhe”. Tällaisia virheitä havaitaan pääasiassa ongelmissa, joiden käypä alue on

rajoittamaton tai yhtään rajoitteita tyydyttävää ratkaisua ei ole. (Greenberg 1993, 65-66) Kun ongelmalle on löydetty optimaalinen ratkaisu, voi sen löytymiseen vaikuttaa vain uusien rajoitusten lisääminen tai olemassa olevien rajoitusten side-ehtojen muuttaminen (Taha 2007, 182-183). Mallin virheiden korjaamisessa yleinen toimintamalli on optimaalisen ratkaisun hakeminen useilla eri versiolla mallista (Hillier & Lieberman 2001, 152-153). Virheenkorjaaminen voidaan nähdä edellytyksenä validoinnille tai sen ensimmäisenä vaiheena.

Validoinnille ei ole yksiselitteistä prosessia, sillä validoinnin menetelmät vaihtelevat riippuen mallin käyttötarkoituksesta, käytetystä mallista ja määrittelyyn käytetystä tiedosta. (Hillier & Lieberman 2001, 16-17) Validointimenetelmät voidaan jakaa mallin rakenteelliseen sekä tulokselliseen validointiin. Rakenteellinen validointi perustuu rajoitteiden määrittelyyn toistamaan havaittu lopputulos käyttäen asiaankuuluvia menetelmiä. Tämän tyyppistä validointia esiintyy, kun mallin rakentaminen pohjautuu kokemukseen sekä todellisiin havaintoihin ja malli on käyttäjien tai asiantuntijoiden käsityksiä vastaava kuvaus mallinnetusta systeemistä. Rakenteellisen validoinnin heikkous piilee siinä, että mallin käyttökelpoisuus oletetaan mallin rakentamisessa hyödynnettyjen tietojen ja menetelmien perusteella, eikä sitä testata systemaattisesti. Rakenteellinen validointi on välttämätön edellytys tulokselliselle validoinnille, joka puolestaan keskittyy systemaattiseen testaamiseen ja mallin tulosten vertailuun reaali maailman vastaaviin havaintoihin. Validoinnissa tyydytään usein käyttämään historialliseen toteumaan perustuvia tietoja, sillä optimointiongelman mallinnuksen lähtökohtana on ajan säästäminen ja jälkikäteen suoritettavat testit ovat usein kalliita sekä aikaa vieviä. Siten optimointimallin validointi keskittyy yleensä määrittämään mallin käyttökelpoisuuden vain sen suunniteltuun käyttöön, laajemman käyttöpotentiaalnin tarkastelun sijaan. Lopullinen tuloksellinen validointitesti toteutuukin usein vasta päätöksentekijöiden käytössä. (McCarl & Aplan 1986, 155-156)

McCarl ja Aplan (1986, 156) tunnistivat mallin validoinnin tärkeimmiksi kohteiksi primääri ongelman päätösmuuttujat, duaalimuuttujat sekä kohdefunktion. Näiden muuttujien systemaattinen validointi on edellytys mallin ratkaisun validoinnille. Systemaattinen tapa suorittaa tuloksellista validointia on retrospektiivinen testi, joka perustuu menneen simuloimiseen optimointimallin avulla hyödyntämällä historiallista dataa. Ongelman ratkaisua arvioidaan sen perusteella, kuinka hyvin optimaalinen ratkaisu olisi suoriutunut, jos sitä olisi

käytetty. Tämän hypoteettisen ratkaisun vertailu osoittaa saavutetaanko mallin avulla yleensä merkittävä parannus nykyiseen käytäntöön verrattuna. Vertailu havainnollistaa myös mallin mahdolliset vajavaisuudet ja kehityskohteet. Heikkoutena tälle lähestymistavalle voidaan nähdä saman datan käyttäminen sekä mallin validoinnissa että sen määrittelyssä. Tästä syystä on tärkeää varmistaa, onko käytetty data tulevaisuutta kuvaavaa, jotta mallin käyttäytyminen on odotettua myös tulevaisuudessa. (Hillier & Lieberman 2001, 17-18)

3.4.2 Postoptimaalinen analyysi

Lineaarisen optimoinnin avulla saavutettu optimaalinen ratkaisu ei välttämättä ole käytännössä ideaali ratkaisu, minkä vuoksi optimoinnin tuloksia on hyödyllistä analysoida myös optimaalisen ratkaisun löytämisen jälkeen. Postoptimaalinen analyysi on tärkeä osa operaatioanalyysia ja keskittyy tutkimaan optimaalisen ratkaisun käyttäytymistä, kun tehtyjä oletuksia muutetaan. Olennainen osa postoptimaalista tarkastelua on herkkyysanalyysi. Simplex-menetelmä mahdollistaa algoritmillisten menetelmien hyödyntämisen mallin herkkyysanalyysissa. (Hillier & Lieberman 2001, 15) Herkkyysanalyysi tutkii mallin tuloksen epävarmuuden jakautumista mallin lähtötietojen eri epävarmuuksien lähteisiin (Saltelli 2002, 579). Herkkyysanalyysin lisäksi postoptimaaliseen analyysiin liittyvät olennaisesti päätökset resurssien allokoinnin suhteen.

Lineaarisen optimoinnin perusoletuksien toteutumisen tutkiminen todettiin hyödylliseksi erityisesti varmuusoletuksen kohdalla. Optimointimallien tulokset riippuvat aina mallille annetuista lähtötiedoista, jotka ovat usein arvioita todellisesta tilanteesta ja vain harvoin täysin eksakteja. Herkkyysanalyysi on olennainen osa mallin ratkaisemista erityisesti, jos mallin parametrien arvoja ei voida määrittää tarkasti. Tällaisissa tilanteissa on hyödyllistä tutkia optimituloksen käyttäytymistä, kun parametrien arvoja muutetaan mahdollisten arvojen joukossa. (Taha 2007, 9) Herkkyysanalyysi on keino määrittää parametrien epävarmuuden vaikutus optimaaliseen tulokseen tai mallin herkkyys muutoksille parametreissa. Herkiksi parametreiksi kutsutaan parametreja, joiden arvoja ei voi muuttaa vaikuttamatta optimaaliseen ratkaisuun. Herkkien parametrien tunnistaminen ja niiden arvojen tarkka määrittäminen on tärkeää, sillä heikosti määritetyt arvot vääristävät ratkaisua. (Hillier & Lieberman 2001, 15) Optimaalinen ratkaisu on luotettava toimintaohje vasta, kun sen toiminta on varmistettu myös

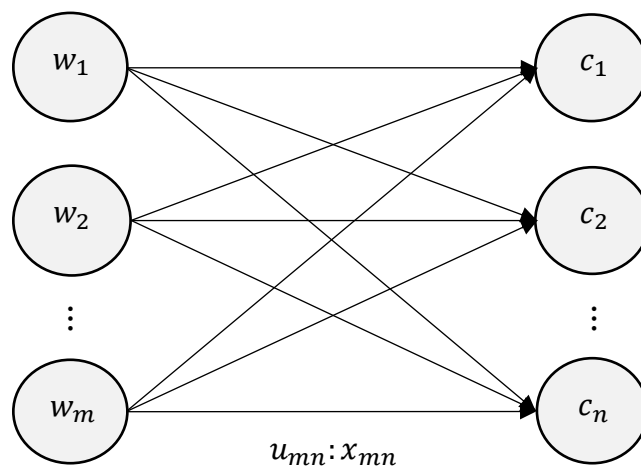
muilla mahdollisilla ongelman mallinuksilla. Monien parametrien arvot asetetaan organisaation johtopolitiikan seurauksena ja ne on siten hyvä tarkistaa, kun niiden mahdolliset vaikutukset malliin on tunnistettu. Herkkyysanalyysi voi tutkia esimerkiksi rajoitteiden sideehtojen ja päätösmuuttujien kertoimien muuttamisen sekä uusien rajoitteiden määrittämisen vaikutusta optimointitehtävän ratkaisuun. (Hillier & Lieberman 2001, 255-284)

Lineaariset optimointiongelmat voidaan usein tulkita resurssien allokointina määritetyille toiminnoille. Tässä tapauksessa mallin rajoitteet määrittävät saatavilla olevat resurssit. Monessa tapauksessa resurssirajoitteiden asettaminen ei ole yksiselitteistä, jolloin mallin käyttäjän tai päätöksentekijän kannalta hyödyllistä tietoa on, kuinka paljon optimaalista ratkaisua voidaan parantaa muuttamalla ongelmalle saatavilla olevia resursseja. Simplex-algoritmi tuottaa tietoa tästä varjohintojen muodossa, joiden avulla optimointiongelman duaalitehtävä mahdollistaa tärkeitä taloudellisia tulkintoja. (Hillier & Lieberman 2001, 153-154; Williams 2013, 107-112) Duaalitehtävä on pääasiallisen optimointitehtävän eli primääritehtävän parametreista määritelty uusi optimointitehtävä, joka keskittyy parametrien muutosten vaikutusten tarkasteluun (Winston & Goldberg 2004, 295).

Duaalimuuttujat liittyvät päätöksentekijän käytettävissä olevien resurssien arvoon, kun primääriongelma on tavallinen maksimointiongelma. Tästä syystä duaalimuuttujiin viitataan varjohintoina. Varjohinnat kuvaavat kohdefunktion optimaalisen arvon muutosta, kun rajoitteiden side-ehtoa muutetaan yhdellä resurssiyksiköllä. Varjohinnan voidaan tulkita kertovan, kuinka paljon päätöksentekijä on valmis maksamaan muutoksesta. Duaalitehtävän tarkastelu tuottaa hyödyllistä tietoa myös herkkyysanalyysin suorittamisen kannalta. Varjohinnat kuvaavat rajoitteisiin tehtyjen muutosten vaikutuksia optimoinnin tuloksiin, ja niiden tarkastelu auttaa määrittämään tulokseen eniten vaikuttavat tekijät. (Winston & Goldberg 2004, 303-314) Tästä seuraa luonnollisesti, että ei-sitovien epäaktiivisten rajoitteiden varjohinta on aina nolla ja mallin ratkaisu ei ole herkkä muutoksille kyseisissä rajoitteissa (Williams 2013, 113). Simplex-algoritmissa ongelman muodostamisen standardimuodossa todettiin vaativan slack-muuttujien lisäämistä ongelmaan. Slack-muuttujat kuvaavat käyttämättömien resurssien määrää optimaalisessa ratkaisussa.

3.5 Kuljetusongelma

Kuljetusongelma on yleinen lineaarinen optimointiongelma, jonka tavoitteena on määrittää optimaalinen tapa toimittaa tietty määrä hyödykkeitä tarjontapisteiltä kysyntäpisteille. Optimaalinen ratkaisu perustuu yleisesti jakelukustannusten minimoimiseen. Kuljetusongelma voidaan laajentaa myös muihin toimintoihin, kuten varaston hallintaan. (Taha 2007, 193) Kuva 11 esittää kuljetusongelman perusrakenteen verkostona, johon on merkitty tarjontapisteet (w_m), kysyntäpisteet (c_n), yksikkökustannukset (u_{mn}) ja toimitettu määrä (x_{mn}).



Kuva 11 Kuljetusongelma verkostona esitettynä (Taha 2007, 194)

Kuvassa 11 esitettyyn verkostoon perustuen kuljetusongelman kohdefunktio voidaan esittää jakelun yksikkökustannuksen u_{ij} ja toimitetun määrän x_{ij} tulon minimointina kaavan 3 mukaisesti. Lisäksi tarjonta- ja kysyntärajoitteet voidaan esittää epäyhtälöinä, joissa tarjonta s_i rajoittaa toimitetun määrän maksimiarvon tarjontapisteille ja kysyntä d_j minimiarvon kysyntäpisteille. Toimitetulle määrälle x_{ij} määritetään ei-negatiivisuus rajoite. (Winston & Goldberg 2004, 362-363)

$$\min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u_{ij} x_{ij}$$

tyyydyttäen

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \leq s_i \quad j = 1, \dots, n \quad (\text{Tarjontarajoite})$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \geq d_j \quad i = 1, \dots, m \quad (\text{Kysyntärajoite})$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Yksinkertaisimmillaan mallin rajoitteina toimivat tarjontapisteiden tarjonta sekä kysyntäpisteiden kysyntä. Kuljetusongelmissa oletetaan kysynnän ja tarjonnan olevan kiinteitä määriä, joten vastaavien eksaktien määrien odotetaan toteutuvan myös mallin ratkaisussa. Todellisuudessa tarjonnalla halutaan usein kuvata toimitettavan määrän maksimiarvoa ja kysynnällä minimiarvoa. Kuljetusongelman sanotaan olevan epätasapainossa tilanteessa, jossa kysynnän ja tarjonnan määrät eroavat. Epätasapainoisessa ongelmassa kuljetusongelmille tehty oletus ei täyty. Hyödyntämällä tekemuuttujia voidaan epätasapainoisesta ongelmasta määrittellä optimointimalli, joka täyttää kuljetusongelman perusoletuksen. Tekemuuttujille ohjataan tarjonnan ja kysynnän yli- ja alijäämä. Jakelukustannukset määritetään olemattomiksi, sillä tekemuuttujat eivät edusta todellisia toimituksia. Lisäksi kuljetusongelmissa oletetaan jakelukustannusten olevan suoraan verrannollisia kuljetettuun määrään, joten mallissa käytetään yksikkökustannuksia. Yksinkertaisimmillaan kuljetusongelman mallinnukseen tarvittavat parametrit muodostuvat kysynnästä, tarjonnasta ja yksikkökustannuksista. Optimaalisen ratkaisun etsimiseen hyödynnetään aiemmin luvussa 3.3 esiteltyä simplex-algoritmia. (Hillier & Lieberman 2001, 354-357; Winston & Goldberg 2004, 363-365)

4 METSÄHAKEVIRTOJEN OPTIMOINTI

Tässä luvussa sovelletaan tutkimuksessa esiteltyä teoriaa ja menetelmiä kohdeyrityksen Neova Oy:n metsähaketoimitusten optimointiin. Tapaustutkimus alkaa ratkaistavan optimointiongelman määrittelyllä, mikä edellyttää kohdeyrityksen logistiikkasuunnitteluun vaikuttavien oletusten ja rajoitusten tunnistamista. Metsähakevirtojen mallintamiseksi optimointiongelmana kootaan kohdeyrityksen tuotantotietokannasta aineisto, joka sisältää kuljetusongelman vaatimat lähtötiedot ja mahdollistaa metsähakkeen toimitusketjun käytännön rajoitteiden mallintamisen. Ongelman määrittelyyn liittyy olennaisesti myös käytettävissä olevan aineiston asettamien rajoitusten huomioiminen ongelman mallinnuksessa. Tutkimuksen laskenta-aineisto ja aineistoon kohdistuva data-analyysi esitellään tässä luvussa. Data-analyysi kohdistuu validoinnissa käytettyyn laskenta-aineistoon, jonka perusteella optimointimallin ratkaisua arvioidaan.

Lopuksi optimointiongelma ratkaistaan historialliseen toteuman mukaisilla lähtötiedoilla. Mallin toiminta validoidaan ja optimaalista ratkaisua analysoidaan tutkimuksen teoriaosassa esitellyillä menetelmillä. Ongelman ratkaisua arvioidaan kohdeyrityksen toteumaa vasten, minkä perusteella tehdään havaintoja mallin saavuttamista hyödyistä sekä tunnistetaan kannattavuutta rajoittavia tekijöitä nykyisessä toiminnassa. Lopuksi nostetaan esiin lineaarisen optimoinnin avulla korjattavia kehityskohteita nykyisessä logistiikkasuunnittelussa ja arvioidaan optimoinnin roolia osana suunnitteluprosessia.

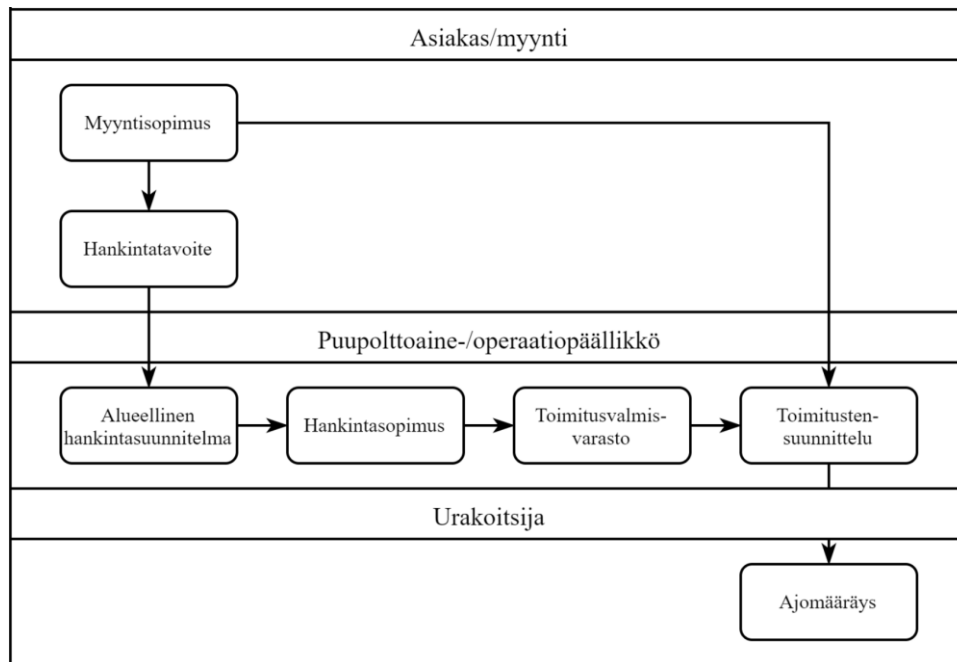
4.1 Kohdeyritys

Tämän tutkimuksen kohdeyrityksenä toimiva Neova Oy on osa kansainvälistä monialakonsernia, jonka liiketoiminnot keskittyvät kasvualustojen, polttoaineiden ja aktiivihiihen tuottamiseen sekä uusien korkean jalostusasteen tuotteiden kehittämiseen paikallisista luonnonmateriaaleista. Neova Oy toimii bioenergian johtavana toimittajana Suomessa, Ruotsissa ja Virossa. Suomessa Neova toimii valtakunnallisesti ja yrityksellä on käytössä tuotantolaitoksia sekä terminaaleja kymmenissä kaupungeissa. Yritys toimittaa paikallisia biopolttoaineita, kuten metsäpolttoaineita ja puupellettejä, energian- ja lämmöntuotantoon sekä energiantuotantoon liittyviä lisäarvopalveluita. (Neova-konserni 2020,

5-12) Lisäksi Neovan polttoaineliiketoimintaan kuuluvat tuuli- ja aurinkovoimahankkeet sekä kiinteistö- ja maaomaisuuden hallinnointi. Kohdeyrityksen uusiutuviin biopolttoaineisiin perustuvaa liiketoimintaa pyritään kasvattamaan voimakkaasti ja se kattaa tällä hetkellä yli puolet energialiiketoiminnan liikevaihdosta. Toiminnan kasvun tavoitteena on paikallisten biopolttoaineiden saatavuuden varmistaminen ja kilpailukyvyvyn kehittäminen. (Neova-konserni 2020)

Tutkimuksen kohdeyrityksessä logistiikkasuunnittelu on osa laajempaa puupolttoaineiden tilaus- ja toimitusprosessia. Toimitusten suunnittelun lähtökohtana toimivat suunnittelujärjestelmään tallennetut myyntisopimukset. Sopimusmäärien perusteella jokaiselle asiakkaalle luodaan alustava tuote- ja kuukausikohtainen toimitussuunnitelma. Toimitusten suunnittelusta vastaava operaatiopäällikkö määrittää ennen lämmityskauden alkua toimitussuunnitelman, joka huomioi sopimusmäärien lisäksi alueellisen varastotilanteen ja ohjaa materiaalivirrat varastopisteistä asiakkaille. Logistiikkaketjussa toimiville urakoitsijoille toimitetaan ajomääräykset ennen lämmityskauden alkua toimitussuunnitelman mukaisesti. Ajomääräyksiä muutetaan ja tarkennetaan asiakkaan välittämän kuukausi-, viikko- tai päiväkohtaisen toimitusohjelman mukaisesti. (Neova Oy, 2021a) Käytännössä toimitusten suunnittelua ohjataan hajautetusti ja kukin operaatiopäällikkö on vastuussa oman vastuualueensa logistiikasta.

Metsähakkeen toimitussuunnittelu seuraa järjestyksessä metsähakkeen raaka-ainehankintaprosessia. Raaka-ainehankinta nojaa vastaavasti myyntisopimuksissa ilmoitettuihin sopimusmääriin. Hankinnan runkosuunnitelma luodaan myyntitavoitteiden ja -näkömien mukaisesti asettamalla seuraavan lämmityskauden alkuun tavoitevarasto. Asiakasaluelähtöisesti toteutetun hankintasuunnittelun tavoitteena on varmistaa asiakkaan kysyntää vastaava paikallinen varasto. (Neova Oy, 2021b) Asiakaskohtaisen hankinnan toteuttaminen edellyttää vastaanotetulle raaka-aineelle määräpaikan määrittämistä hankintasuunnitelman mukaisesti toiminnanohjausjärjestelmään. Tieto määräpaikasta ohjautuu tilaus- ja toimitusprosessiin ja siten myös osaksi varastohallintaa sekä pohjatiedoksi toimitusten suunnitteluun. Kuvassa 12 esitetään kohdeyrityksen yksinkertaistetut raaka-ainehankinta- ja toimitusprosessit logistiikkasuunnittelun näkökulmasta.



Kuva 12 Kohdeyrityksen yksinkertaistettu hankinta- ja toimitusprosessi

4.2 Ongelman määrittely

Tässä diplomityössä käsiteltävä optimointiongelma havaittiin tarpeesta kehittää metsähakkeen toimitusketjun kannattavuutta muuttuvan toimintaympäristön ja kasvavien volyyymien vaikutuksesta. Ongelman taustalla on oletus kohdeyrityksen logistiikkasuunnittelussa saatavilla olevan tiedon tehokkaammasta hyödyntämisestä sekä potentiaalista kehittää suunnitteluprosessia ja toimitusketjun kannattavuutta.

Nykyinen logistiikan suunnitteluprosessi ei mahdollista kaiken saatavilla olevan tiedon hyödyntämistä ja perustuu alueellisesti hajautettuun päätöksentekoon, arvoketjun aikaisemmista vaiheista johdettuun tietoon sekä vakiintuneisiin kannattavuusoletuksiin. Metsähakkeen toimituslogistiikkaan vaikuttavien tekijöiden tunnistaminen ja hallinta on kuitenkin haastavaa ilman mallinnusta. Kokonaisuuden kannalta edullisimpien toimintatapojen tunnistamista hankaloittavat sekä tarjontaan että kysyntään liittyvät tekijät. Tarjontapisteiden lukumäärä ja heterogeenisuus sekä sijaintien ja saatavuuden vaihtuvuus luovat jatkuvasti muuttuvan tilanteen, jonka mahdollisuuksia tai riskejä on haasteellista huomioida logistiikkasuunnittelussa. Lisäksi kysynnän kausivaihtelu ja tarjonnan paikallisuus rajoittavat keskitettyä suunnittelua ilman mallinnusta. Kehittyneiden mallinnusmenetelmien käytön

odotetaan parantavan päätöksenteossa taustalla olevan tiedon ja kannattavuuslaskelmien luotettavuutta, kehittävän toiminnan ennustettavuutta ja suunnitteluprosessin järjestelmällisyyttä.

Optimointiongelman määrittelyssä pyritään tunnistamaan (1) kuvaus päätösvaihtoehdoista, (2) tutkimuksen tavoite sekä (3) mallinnetun järjestelmän toiminnan rajoitteet. Tämän tutkimuksen tavoitteena on muodostaa lineaariseen optimointiin perustuva malli, jonka ratkaisu kuvaa kohdeyrityksen monijaksoista toimitussuunnitelmaa yhdelle toimituskaudelle. Toimituksia kuvataan metsähakevirtoina kysyntä- ja tarjontapisteiden välillä tiettyinä ajankohtina. Kuvattujen virtojen volyyymi, ajankohta sekä alku- ja loppupisteet muodostavat ongelman päätösvaihtoehdot. Mallinnetun optimointiongelman rajoitteet perustuvat teoriaosuudessa esiteltyihin toimitusketjun käytännön rajoitteisiin sekä kohdeyrityksen prosessissa saatavilla olevaan dataan. Ongelmalle asetetut rajoitteet tunnistetaan ja kuvaillaan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa aineiston esittelyn sekä mallin rakentamisen yhteydessä.

4.3 Aineiston kuvaus

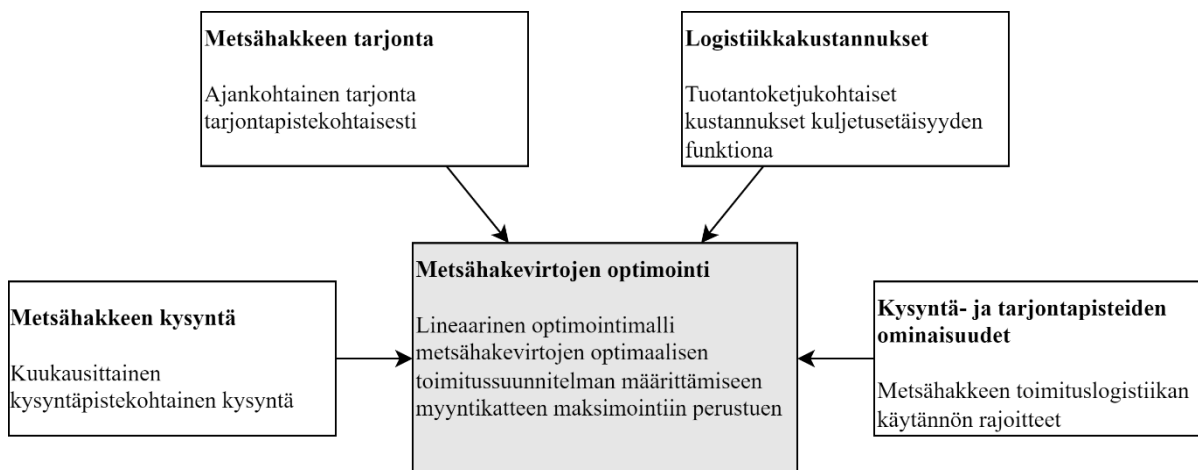
Tässä tutkimuksessa käytetty aineisto jaetaan määrittely- ja validointiaineistoon. Määrittelyaineisto viittaa optimointimallin määrittelyssä käytettyyn aineistoon, joka on kerätty kohdeyrityksen asiantuntijoiden palautteen pohjalta. Tämä aineisto kuvaa tarkasti kohdeyritykselle logistiikkasuunnittelussa käytettävissä olevaa ajankohtaista tietoa. Määrittelyaineisto soveltuu siten käytettäväksi, kun arvioidaan metsähakevirtojen mallinnuksen mahdollisuuksia. Validointiin käytetty laskenta-aineisto puolestaan perustuu kohdeyrityksen toiminnasta kerättyyn tietoon viimeisen kokonaisen vertailukelpoisen toimituskauden ajalta. Toimituskaudella viitataan noin vuoden mittaiseen kesän lopussa alkavaan kauteen, joka painottuu lämmön- ja energiantuotannon tarpeiden mukaisesti talvikuukausille. Metsähakkeen tilaus- ja toimitusprosessi perustuu kausikohtaiseen suunnittelun ja toimituskauden aikana pyritään toimittamaan kaudelle hankittu energiapuu.

Huomionarvoista on, että optimointimallin validointiaineisto perustuu historialliseen toteumaan, sillä määrittelyaineistoa vastaava ajankohtainen laskenta-aineisto ei ole saatavilla tutkimuksen tekohetkellä kohdeyrityksen toiminnan kausiluontoisuuden vuoksi. Historialliseen

dataan perustuva validointiaineisto muodostaa tutkimushetkellä realistisen ja luotettavan vertailukohdan tutkimuksen optimointiongelman ratkaisun arviointiin. Määrittelyaineisto kuvaa puolestaan tarkasti järjestelmän mallinnukseen saatavilla olevaa tietoa ja järjestelmän ominaisuuksia. Seuraavissa alaluvuissa kuvataan määrittely- ja validointiaineiston tietoja. Määrittelyaineiston käsittely keskittyy kuvaamaan saatavilla olevaa aineistoa optimointiongelman mallinnuksen näkökulmasta, kun taas validointiaineiston käsittely keskittyy laskenta-aineiston data-analyysin ja käsittelyyn.

4.3.1 Määrittelyaineisto

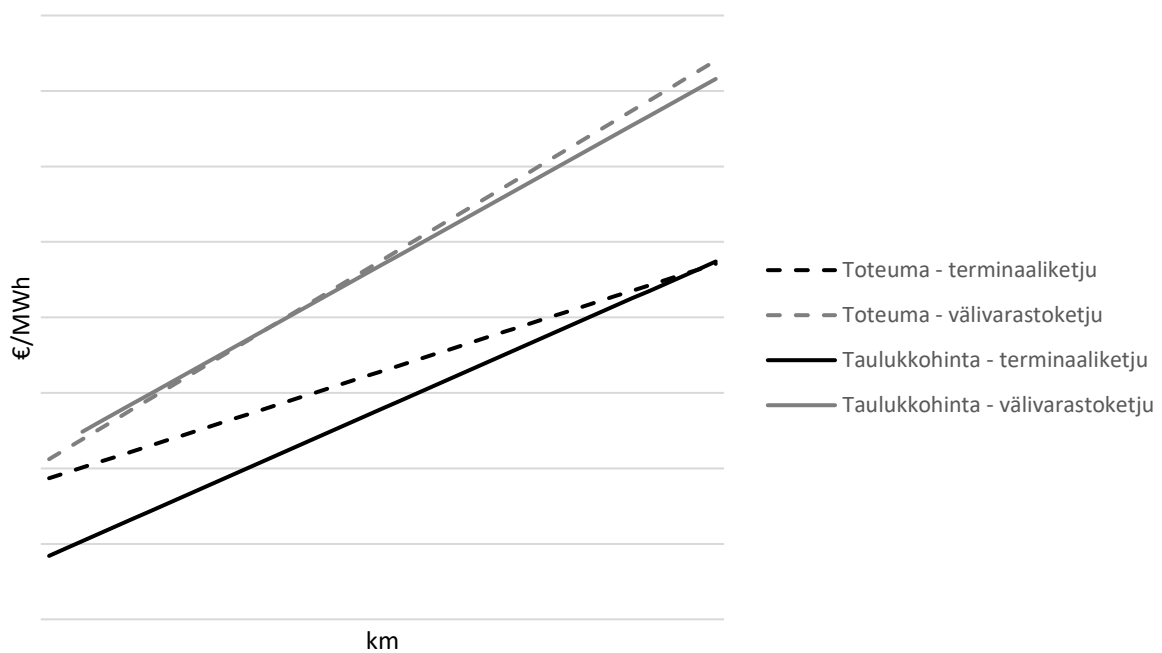
Optimointiongelman mallinnukseen koostettu data kuvaa tutkimuksen teoriaosuudessa esitellyn kuljetusongelman perustietoja, kuten kysyntää, tarjontaa ja materiaalivirtojen kustannuksia, sekä ongelman käytännön rajoitteiksi mallinnettuja kysyntä- ja tarjontapisteiden ominaisuuksia. Mallinnukseen koostettu data on monijaksoista ja käytetyt tiedot eritellään jakso-, kysyntäpiste- tai tarjontapistekohtaisesti. Monijaksoisen aineiston aika-askel on yksi kuukausi. Kysyntä- ja tarjontapisteiden kategorisille ominaisuuksille on aineistossa johdettu kohdeyrityksen asiantuntijoiden tuella tarkat arvot edellä mainitun jaottelun mukaisesti. Kuvassa 13 on kuvattu optimointimallin rakenne tietoluokittain ja -lähteittäin.



Kuva 13 Metsähakevirtojen optimointimallin rakenne

Optimointiongelman kysyntä kuvataan megawattitunneissa (MWh) kysyntäpiste- ja kuukausikohtaisesti. Kysyntäpisteiden metsähakkeen hinta (€/MWh) on määritelty vastaavan

jaottelun mukaisesti. Myös tarjonta kuvataan megawattitunneissa tarjontapiste- ja kuukausikohtaisesti. Tarjonta- ja kysyntäpisteiden välille kohdistuvat tuotantoketjukohtaiset logistiikkakustannukset on määritetty hyödyntämällä yksinkertaista lineaarista regressiota, jonka riippumattomana muuttujana toimii kuljetusetäisyys. Kustannukset esitetään yksikkökustannuksina, jotka kuvaavat yhden toimitetun yksikön keskimääräisiä kustannuksia. Lineaarinen regressio toteutettiin sekä kohdeyrityksen toteutuneilla haketus- ja kaukokuljetuskustannuksilla että vastaavilla urakoinnin sopimushinnoilla. Kustannusten mallinnus on havainnollistettu kuvassa 14. Kustannukset ovat linjassa teoriassa esiteltyjen havaintojen kanssa. Sopimushintoja korkeampia terminaalikustannuksia selittää hakkeen käsittelykulujen merkittävä osuus terminaaliketjussa.



Kuva 14 Logistiikkakustannukset eri tuotantoketjuilla toteumana ja keskitaulukkohintana

Sekä kysyntä- että tarjontapisteille on määritelty sijainti ja tuotetyyppi. Sijainti on pakollinen tieto määrittämään paikallinen tarjonta ja etäisyydet pisteiden välillä. Jokaiselle pisteelle on saatavilla tarkka sijainti, joka ilmoitetaan pituus- ja leveysasteina. Kysyntäpisteille määrätty tuotetyypit puolestaan täsmentävät, kuinka kysyntä voidaan tyydyttää. Tuotetyyppien määrittely perustuu myyntisopimukseen, minkä lisäksi tietoa täydennetään jatkuvasti aiemmin toteutuneiden materiaalivirtojen perusteella. Yhdelle kysyntäpisteelle voi siten olla määritelty

useita sopivia tuotetyyppejä. Käytännössä rajoitteet tuotetyypin suhteen ovat seurausta laitosteknisistä ominaisuuksista lämmön- ja energiantuotannossa sekä asiakkaan myyntisopimuksen ehdoista. Tässä tutkimuksessa käsitellään primäärisistä biomassoista tuotettua metsähaketta, joten tuotetyypeiksi valittiin metsähakkeen raaka-ainajakeista rankapuu, kokopuu, hakkuutähteet sekä kannot. Tarjontapisteiden tuotetyyppi määritellään vastaavalla jaottelulla kuin kysyntäpisteille. Tuotetyyppi perustuu aina metsähakkeen raaka-ainajakeeseen, eikä siihen siten vaikuta varastoidun tuotteen muoto (haketettu, ei-haketettu). Yksittäinen tarjontapiste voi muodostua vain yhdestä tuotetyypistä, joten tarjonta mallinnetaan varastoerän tasolla.

Tarjontapisteille yksilöllisiä ominaisuuksia ovat kuljetettavuus, toimitettavuus sekä varastotyyppi. Tarjontapisteen kuljetettavuus kuvaa varaston saatavuutta eri vuodenaikoina. Tarjontapiste voi olla kuljetettavissa aina, talvella, ei kelirikon aikana tai kesällä. Kuljetettavuuden mahdolliset arvot on määritelty optimointimallin jaksoja vastaaviksi arvoiksi, jotka määrittävät mallissa tarkasti tarjontapistekohtaisen kuljetettavuusrajoitteen eri ajanhetkinä. Kuljetettavuuteen vaikuttavat olosuhteet voivat vaihdella toimituskausien välillä merkittävästi, joten arvot on syytä tarkistaa säännöllisesti ja huomioida niiden vaikutukset mallin tuloksia arvioidessa.

Metsähakkeen tärkein laatutekijä on kosteus, joka huomioidaan tarjontapisteiden toimituskelpoisuudella. Toimitettavuus kuvaa ajanhetkeä, josta eteenpäin tarjontapisteen kosteuspitoisuus on riittävän matala toimitettavaksi sekä kohdeyrityksen kannattavuustavoitteet että kysynnän laatuvaatimukset huomioiden. Energiapuun kosteuteen vaikuttaa sekä korjuun ajankohta että kausivaihtelu. Tarjontapisteiden toimitettavuuden luokitteluksi asetettiin kohdeyrityksen käytännön ja esitellyn teorian mukainen sekä vuodenajan että korjuuhetken huomioiva raja. Tarjontapiste luokitellaan toimitettavaksi, kun metsähakkeen raaka-aine on kuivunut yhden kesän yli välivarastossa vastaanoton jälkeen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että ennen määritettyä päivämäärää vastaanotetut varastoerät luetaan toimitettaviksi seuraavan toimituskauden alusta alkaen. Rajaksi asetetun päivämäärän jälkeen vastaanotettu energiapuu ohjataan käytettäväksi seuraavalle toimituskaudelle optimointi-ikkunan ulkopuolelle.

Tarjontapisteet on määritelty joko tienvarsi- tai terminaalivarastoiksi. Varastotyypin perusteella määritetään käytetty tuotantoketju ja siihen liittyvät logistiikkakustannukset. Tarjontapisteiden varastotyyppi määritetään toimituskauden alussa, jolloin kaikki terminaalihaketusketjun välisiirrot oletetaan toteutuneiksi. Oletus perustuu kohdeyrityksen toimintamalliin, jossa välisiirrot pyritään toteuttamaan lämmityskauden ulkopuolella kesäkuukausina. Tämä mahdollistaa urakointiverkoston käytettävissä olevan kapasiteetin hyödyntämisen kannattavasti ja kapasiteetin kuormituksen jakamisen tasaisemmin.

Tuotantoketjujen välillä on eroavaisuuksia erityisesti kaluston käyttöasteessa, mikä havaitaan niin kustannuksissa kuin kaluston käyttökapasiteetissa. Kysyntään ja tarjontapisteiden saatavuuteen vaikuttaa kausivaihtelu, minkä seurauksena talvikuukausina havaitaan tarve painottaa terminaalihaketusketjun käyttöä. Tämä selittyy osittain tienvarsivarastojen heikommalla saatavuudella ja laadunhallintaan liittyvillä tekijöillä, mutta pääsyy on terminaaliketjun parempi käyttöaste ja urakointiverkoston saatavilla oleva kapasiteetti. Rajoitettu kalustokapasiteetti voidaan tarvittaessa huomioida mallissa hyödyntämällä tietoa tarjontapisteiden varastotyyppistä ja asettamalla vaatimuksia tuotantoketjujen käytölle toimituskauden aikana. Kapasiteettirajoitetta käsitellään tarkemmin mallin jatkojalostuksen yhteydessä luvussa 4.9.

4.3.2 Validointiaineisto

Tutkimuksen validointiaineisto perustuu viimeisimmän kokonaisen toimituskauden ajalta kerättyyn dataan, joka vastaa mahdollisimman tarkasti optimointiongelman mallinnuksessa käytettyä määrittelyaineistoa ja logistiikkasuunnittelussa käytössä olevia lähtötietoja. Aineisto kerättiin 1.8.-31.5. väliseltä ajanjaksolta, joka vastaa kohdeyrityksen yhtä toimituskautta ja riittää kuvaamaan kausivaihtelun vaikutukset mallinnuksessa. Tässä alaluvussa kuvataan validointiaineiston eroavaisuuksia määrittelyaineistosta sekä esitellään aineiston data-analyysissa tehdyt havainnot. Analyysia rajoittaa tutkimuksen kohdeyrityksen salattavat tiedot, minkä vuoksi analyysissa esitetään pääasiassa suhteellisia arvoja ja jakaumia.

Validointiaineisto ei ole täysin määrittelyaineistoa vastaava. Validointiaineisto perustuu toteumaan, joten mallin lähtötietojen, kuten kysynnän ja tarjonnan, suhteen ei esiinny

määrittelyaineistoa vastaavaa epävarmuutta. Huomattavaa sen sijaan on, että validointiaineistolla ratkaistava optimointiongelma on tasapainoinen. Todellisuudessa tarjonnan ja kysynnän määrä sisältää epävarmuutta ja tutkimuksen optimointiongelma on käytännössä poikkeuksetta epätasapainossa.

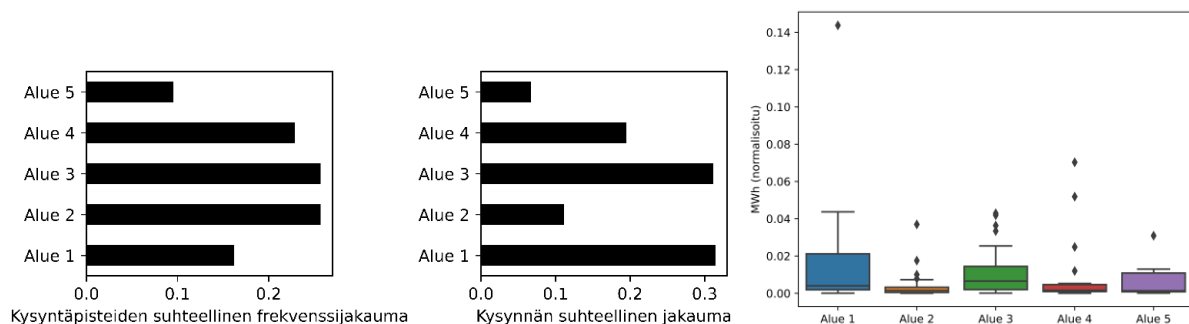
Toinen huomattava eroavaisuus havaitaan tiedon saatavuudessa, sillä tietoa varastojen toimitettavuudesta ei ole saatavissa takautuvasti. Tämä rajoite korjataan määrittämällä aineiston alkuajankohta siten, että kaikki tarjontapisteeet voidaan varmuudella määrittää koko optimointijakson ajalle toimitettaviksi. Käytännössä tämä tarkoittaa optimointijakson aloittamista samasta päivämäärästä, jota on käytetty määrittämään energiapuun toimitettavuus. Tällöin metsähakkeen laatutekijöihin ei kohdistu epävarmuutta ratkaisua arvioitaessa. Validointiaineiston kysyntä ja tarjonta määritettiin kauden aikana toteutuneiden toimitusten mukaisesti, mikä varmistaa tarjontapistetietojen oikeellisuuden ja mallintaa parhaiten optimoinnin tavoiteltua käyttötarkoitusta. Mallin tarjontaan ei siten sisällytetty validointikauden aikana saatavilla olleiden käyttämättömien tarjontapisteeiden tarjontaa. Käyttämättömän tarjonnan sisällyttäminen kääntää ongelman epätasapainoiseksi, sillä tarjonnan määrä ylittää kysynnän. Epätasapainoinen ongelma keventää tässä tapauksessa tarjonnan rajoituksia ja mahdollistaa paremmat tulokset.

Validointiaineisto koostuu 110 kysyntä- ja 1692 tarjontapisteeestä. Aineiston ulkopuolelle jätettiin 2 kysyntäpistettä, joiden kysyntä ei koostunut primäärisistä biomassoista. Tarjontapisteeistä sivuutettiin 7 kappaletta, jotka sisälsivät diskreettien jakaumien ulkopuolisia odottamattomia tai virheellisesti syötettyjä arvoja tai puuttuvia arvoja. Tutkimuksen lopullinen aineisto ei sisällä puuttuvia arvoja. Aineiston muokkaamisen jälkeen jäljelle jäi 108 kysyntä- ja 1685 tarjontapistettä. Jatkuvat muuttujat muodostavat optimointiongelman kysyntä- ja tarjontarajoitteet sekä toimivat parametreina kustannusmallinnuksessa. Logistiikkasuunnittelun käytännön rajoitteita kuvataan pääasiassa diskreeteillä muuttujilla. Taulukossa 1 esitetään validointiaineiston tyytit ja selitteet.

Taulukko 1 Laskenta-aineisto

Muuttuja	Tyyppi, mitta-asteikko	Selite
Kysyntäpisteet		
Kysyntäpiste	Diskreetti, laatuero	Asiakkaan tunnus
Kysyntä, MWh	Jatkuva, suhdeluku	Asiakkaan kysyntä
Hinta, €/MWh	Jatkuva, suhdeluku	Asiakkaan hinta
Jakso	Diskreetti, järjestys	Havainnon jakso
Sijainti	Diskreetti, välimatka	Kysyntäpisteen sijainti leveys- ja pituusasteina
Tuotetyyppi	Diskreetti, laatuero	Asiakkaan kysynnän täyttämiseen sallitut tuotteet
Tarjontapisteet		
Tarjontapiste	Diskreetti, laatuero	Varastoerän tunnus
Tarjonta, MWh	Jatkuva, suhdeluku	Varaston toimitettavan uuden tarjonnan määrä
Logistiikkakustannus, €/MWh/km	Jatkuva, suhdeluku	Tuotantoketjukohtaiset yksikkökustannukset
Jakso	Diskreetti, järjestys	Havainnon jakso
Sijainti	Diskreetti, välimatka	Tarjontapisteen sijainti leveys- ja pituusasteina
Tuotetyyppi	Diskreetti, laatuero	Tarjontapisteessä varastoitu tuote
Kuljetettavuus	Diskreetti, laatuero	Varaston saatavuus eri jaksoina
Toimitettavuus	Jatkuva, järjestys	Varaston ensimmäinen mahdollinen toimitusjakso
Varastotyyppi	Diskreetti, laatuero	Varaston toimituksissa käytetty tuotantoketju

Metsähake on paikallinen polttoaine, jonka kysyntää ja tarjontaa on tarkasteltava alueellisesti. Kysyntä- sekä tarjontapisteet on jaettu ryhmiin sijainnin perusteella, mikä mahdollistaa alueellisen analyysin. Ryhmät vastaavat kohdeyrityksen liiketoiminta-alueita, mutta ovat suurempia kuin yksittäisen operaatiopäällikön vastuualue. Kuvassa 15 esitetään metsähakkeen kysyntäpisteiden suhteellinen frekvenssijakauma ja kysynnän suhteellinen jakauma alueittain.

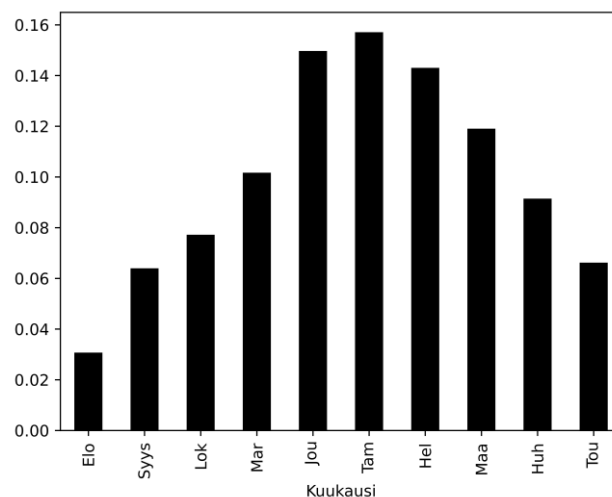


Kuva 15 Kysynnän alueellinen jakauma

Kuvassa 15 esitetyistä jakaumista havaitaan, että kysyntäpisteiden ja kysynnän suhteellisessa määrässä on merkittäviä eroja alueiden välillä. Alueen 2 suhteellinen osuus kysyntäpisteistä on suuri, mutta kysyntä huomattavasti vähäisempää muihin vastaavan määrän kysyntäpisteitä sisältäviin alueisiin verrattuna. Tämä kertoo pienen kokoluokan lämpö- ja voimalaitoksista.

Alueella 1 kysyntäpisteitä on kysyntään suhteessa pieni määrä, mikä puolestaan viittaa suuren kokoluokan laitoksiin. Alueen 1 kohdalla havaitaan kuvan 15 laatikko-janakuviossa huomattavan suuria ääriarvoja, vaikka alueen mediaani on vastaava tai matalampi suhteessa muihin alueisiin. Tämä vahvistaa, että alueella on yksittäisiä kokoluokaltaan merkittävästi keskiarvoa suurempia laitoksia. Muiden alueiden kohdalla kysyntäpisteiden frekvenssi vastaa suhteellisen tasaisesti kysynnän jakaumaa. Huomattavaa on kuitenkin alueen 4 sisältämät yksittäiset ääriarvot muuten varsin tiiviissä jakaumassa, mikä viittaa suurin laitoksiin muuten matalan kysynnän alueella. Myös muilla alueilla havaitaan yksittäisiä ääriarvoja kysyntäpisteissä, mutta huomattavasti alhaisemmissa määrin.

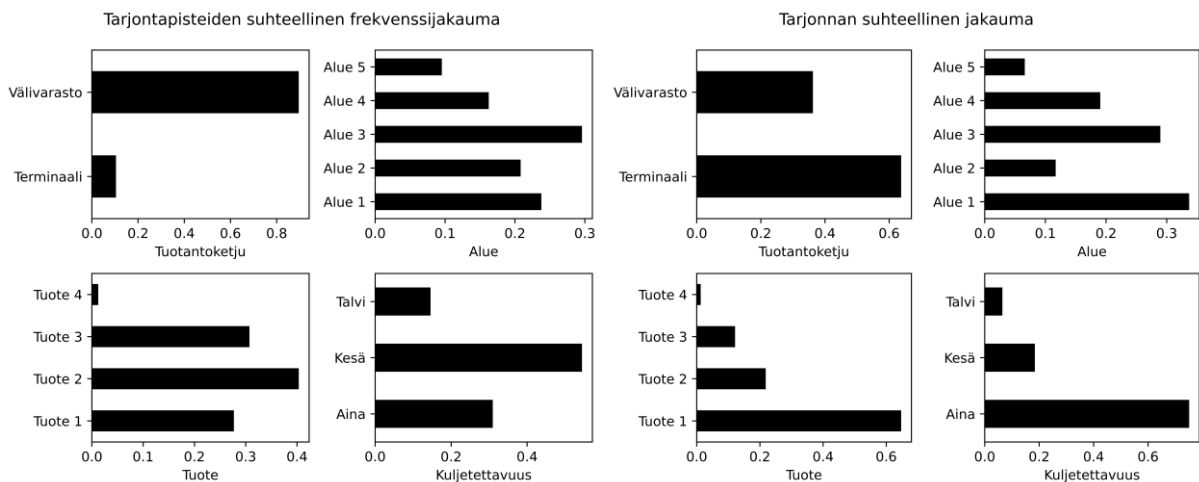
Kysynnän suhteellinen jakautuminen eri kuukausille on visualisoitu kuvassa 16. Kuvasta havaitaan validointiaineiston noudattavan teoriassa esiteltyjä oletuksia kysynnän kausivaihtelusta. Toimituskauden huippukuukausien kysyntä on noin 5-kertainen verrattuna kesäkuukausien kysyntään. Validointiaineisto muodostaa tasapainoisen optimointiongelman, joten tarjonta ja kysyntä voidaan jakaa identtisesti kuukausille. Kuvassa visualisoitu kysyntä ei kuitenkaan kuvaa toimitettavuus- ja kuljetettavuusrajoitteiden puitteissa toimitettavissa olevaa kuukausittaista maksimimäärää.



Kuva 16 Kysynnän suhteellinen kausivaihtelu validointiaineistossa

Tarjontapisteiden suhteellinen frekvenssijakauma sekä tarjonnan jakauma esitetään kuvassa 17 alueen, tuotantoketjun, tuotetyypin sekä kuljetettavuuden mukaan luokiteltuna. Valtaosa tarjontapisteistä kuuluu tienvarsihaketusketjuun, mutta tarjonnasta yli 60 prosenttia koostuu

terminaalihaketusketjusta. Tämä on yhdenmukaista metsähakkeen toimitusketjua käsittelevän kirjallisuuden kanssa, sillä terminaaliketjussa laajoja keskitettyjä pisteitä esiintyy määrällisesti vähemmän. Alueet 1 ja 3 muodostavat yhdessä yli 60 prosenttia kokonaistarjonnasta, ja alueilla 2 ja 5 tarjonta on selvästi matalin. Alueellisesti tarjontapisteiden määrät mukailevat kysyntää, mikä on odotettua tasapainoisessa ongelmassa, mutta viittaa myös kohdeyrityksen onnistuneeseen hankintasuunnitteluun validointikaudella.



Kuva 17 Tarjontapisteiden suhteelliset frekvenssijakaumat ja tarjonnan jakaumat

Vain alueen 2 tarjontapisteiden suhteellisen frekvenssin havaitaan olevan merkittävästi tarjontaa suurempi. Suuri frekvenssi selittyy alueen keskiarvoa suuremmalla tienvarsiketjun osuudella, joka näyttäytyy tarjontapisteen kokoa pienentävänä tekijänä. Tuotteet 1, 2 ja 3 muodostavat valtaosan tarjonnasta. Tuotteen 4 osuus kokonaistarjonnasta on vain 1 prosentti. Kuvasta 17 havaitaan tuotteen 1 tarjonnan kattavan valtaosan kokonaistarjonnasta suhteellisen pienestä tarjontapisteiden määrästä huolimatta. Tämä selittyy tuotteen 1 suurella osuudella terminaaliketjussa. Valtaosa tarjontapisteistä on kuljetettavissa kesällä tai aina. Kokonaistarjonnasta puolestaan valtaosa on toimitettavissa aina, noin 20 % kesällä ja vain 7 % talvella. Kirjallisuudessa esille tuoduista terminaaliketjun eduista merkittävin on saatavuuden varmistaminen. Tämän vuoksi on odotettua että, suurimman osan tarjonnasta muodostuessa terminaaliketjun tarjontapisteistä, on myös valtaosa tarjonnasta toimitettavissa aina. Vastaavasti tarjontapisteiden suhteellisessa jakaumassa valtaosa pisteistä on toimitettavissa kesällä, sillä tienvarsivarastoja on määrällisesti enemmän. Kysynnän ja tarjonnan suhteellinen jakauma alueittain on validointiaineistossa yhtenevä.

4.4 Mallinnuksen menetelmät

Tutkimuksen optimointiongelma mallinnetaan lineaarisen ohjelmoinnin menetelmillä. Lineaarisella optimoinnilla on laaja historia vastaavien ongelmien ratkaisemisessa aikaisemmassa tutkimuksessa, minkä vuoksi se valittiin myös tämän diplomityön menetelmäksi. Lisäksi ongelman asettamat rajoitteet voidaan kuvata tehokkaimmin lineaarisena kuljetusongelmana. Tässä tutkimuksessa ratkaistu kuljetusongelma on päätösmuuttujien ja rajoitteiden määrältä laaja, joten on parasta tukeutua laajasti todennettuun teoriaan. Ratkaistavan ongelman koko rajoittaa myös mallinnukseen ja ratkaisuun käytettyä ohjelmistoa. Optimointimalli muodostetaan Python-ohjelmointikielellä Pulp-kirjastoa hyödyntäen, mikä mahdollistaa tietojen käsittelyn ja ongelman ratkaisemisen kohtuullisessa ajassa ja riittävän tehokkaasti mallin käyttötarkoitukseen. Ongelma ratkaistaan avoimen lähdekoodin CLP-ratkaisimella (COIN-OR Linear Program), joka perustuu Simplex-algoritmiin ja mahdollistaa teoriaosuudessa esitellyt algoritmilliset menetelmät mallin validoinnissa.

Osana optimointiongelmaa mallinnetaan kohdeyrityksen logistiikkakustannuksia. Kustannusten mallinnuksessa on hyödynnetty yksinkertaista lineaarista regressiota. Kysyntä- ja tarjontapisteiden väliset yksikkökustannukset määritetään kuljetusetäisyyksien perusteella. Ongelman koon vuoksi kysyntä- ja tarjontapisteiden väliset kuljetusetäisyydet määritetään lineaarisena etäisyytenä havarsine-kaavalla lasketuista välimatkoista. Havarsine-kaava on navigoinnissa tärkeä trigonometrinen yhtälö, joka määrittää isoympyräreitit kahden pisteen välillä hyödyntämällä pituus- ja leveysasteita. (Chopde & Nichat 2013, 298-299)

Tarkkojen tiekuljetusetäisyyksien määrittämiseen ei ollut saatavilla tutkimuksen vaatimuksia täyttävää paikkatietoratkaisua, minkä vuoksi tämä sisällytetään määritellyn mallin kehityskohteeksi. Tiekuljetusetäisyydet arvioidaan 1,28 kertoimella, joka perustuu kahden pisteen välisen lineaarisen etäisyyden keskimääräiseen suhteeseen tietä pitkin mitattuun etäisyyteen Suomessa. Kerroin on peräisin työmatkoja Suomessa tarkastelleesta tutkimuksesta, joka tarjoaa kattavan lähteen koko Suomen alueella etäisyyksiä tarkastellessa. Matkoissa havaitaan pieniä heittoja alueellisesti tieverkon kattavuuden sekä vesistöjen vaikutuksesta. (Tilastokeskus 2013) Kerroin on linjassa kohdeyrityksessä aiemmin käytettyjen arvojen kanssa.

Koko Suomen keskiarvon arvioitiin mahdollistavan tämän tutkimuksen kannalta riittävän tarkkuuden, kun tarkastellaan tarjonta- ja kysyntäpisteiden sijainteja suhteessa suuriin vesistöihin ja tieverkoston kattavuuteen.

4.5 Optimointimallin määrittely

Tässä tutkimuksessa määritelty kuljetusongelma toteutetaan maksimointiongelmana. Ongelman ratkaisu muodostaa optimaalisen toimitussuunnitelman määritellylle optimointijaksolle kullekin kysyntä- ja tarjontapisteelle. Ratkaisu perustuu kokonaisuuden optimointiin. Optimointimallin maksimoitava kohdefunktio Z kuvaa metsähakkeen myyntikatetta. Myyntikate määritellään metsähakkeen myyntihinnan p_{ik} ja koko toimitusketjun muuttuvien yksikkökustannusten c_j erotuksena. Kohdefunktio muodostuu myyntikatteen tulosta toimitetun määrän x_{ijk} kanssa (kaava 4). Toimitetut määrät x_{ijk} toimivat optimointiongelman päätösmuuttujina ja määrittävät toimitetun määrän megawattitunteina kysyntäpisteeltä i tarjontapisteelle j ajanhetkellä k .

$$\max Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^l (p_{ik} - (c_j k_{ij})) x_{ijk} \quad (4)$$

Myyntikatteen käyttäminen kohdefunktiona sisällyttää tarjontapisteille jo toteutuneet hankintaketjun kustannukset ongelmaan ja asettaa siten logistiikan optimoinnin kannalta varastot epätasa-arvoiseen asemaan. Jos varastoja ei nähdä yhdenmukaisina, on sillä heikentävä vaikutus varastonkiertoon hankintakustannuksiltaan korkeiden erien kohdalla. Lisäksi malli suosii ei-käytännöllisiä ratkaisuja erityisen kannattavien tarjontapisteiden kohdalla. Nämä ongelmat korostuvat erityisesti validointiaineiston muodostamassa tasapainoisessa kuljetusongelmassa, jossa kaikki tarjonta käytetään. Tutkimuksen optimointimallin kohdefunktio voidaan tarpeen mukaan muodostaa myös myyntihinnan p_{jk} ja logistiikkakustannusten c_{jk} erotuksena, jolloin optimaalinen ratkaisu johtaa päätöksentekijän kannalta käytännöllisempiin tuloksiin edellä mainituissa tilanteissa.

Päätösmuuttujien arvoja rajoittavat epäyhtälöinä esitetyt tarjonta-, kysyntä- ja ei-negatiivisuusrajoitteet sekä yhtälöinä esitetyt binääriset yhteensopivuus- ja

kuljettavuusrajoitteet. Toimitusten määrää rajoittaa tarjonta s_{jk} (kaava 5). Määrä rajoitetaan pienemmäksi tai yhtä suureksi kuin tarjontapisteen tarjonta koko kauden sekä yksittäisen jakson ajalta, mikä mahdollistaa tarjontapisteen tarjonnan jakamisen usealle jaksolle toimitettavaksi. Tarjontarajoite esitetään tarjontapisteen j ja ajanhetken k suhteen. Tarjontaan sisällytetään myös toimitettavuusrajoite ilmoittamalla tarjonta s_{jk} vasta ajanhetkellä k , jossa tarjontapiste on luokiteltu toimitettavaksi. Kysyntäpisteiden puolestaan oletetaan vaativan toimituksia korkeintaan kysynnän d_{ik} mukaisen määrän, joten rajoitteeksi asetetaan kysynnän kanssa yhtä suuri tai pienempi toimitettu määrä (kaava 6).

Tarjonta

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=1}^m x_{ij1} &\leq s_{j1} & j = 1, \dots, n \\
 \sum_{i=1}^m x_{ij1} + \sum_{i=1}^m x_{ij2} &\leq s_{j1} + s_{j2} & j = 1, \dots, n \\
 &\vdots \\
 \sum_{i=1}^m x_{ij1} + \sum_{i=1}^m x_{ij2} + \dots + \sum_{i=1}^m x_{ijk} &\leq s_{j1} + s_{j2} + \dots + s_{jk} & j = 1, \dots, n
 \end{aligned} \tag{5}$$

Kysyntä

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq d_{ik} \quad i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, l \tag{6}$$

Yhteensopivuusrajoite rajoittaa toimitukset vain yhteensopivien varastojen ja asiakkaiden välille, jonka määrittää binäärinen parametri a_{ij} (kaava 7). Yhteensopivuus määritellään validointiaineistossa esiteltyjen tuotetyyppien mukaisesti ja se kuvaa tarjontapisteen raaka-ainejakeen mahdollisuutta tyydyttää kysyntäpisteiden kysyntä sopimuksen tai laatukriteerien mukaisesti. Kuljetettavuusrajoite estää toimitukset tarjontapisteiltä tiettyinä kuukausina kuljetettavuuden b_{jk} mukaisesti (kaava 8). Kaavan 7 yhteensopivuusrajoite sallii toimitukset yli kaikkien ajanhetkien binääriparametrin a_{ij} lukuarvon ollessa 1. Vastaavasti kaavan 8 kuljetettavuusrajoite sallii toimitukset yli kaikkien kysyntäpisteiden parametrin b_{ij} lukuarvon ollessa 1. Toimitettavien määrien on oltava aina positiivisia, mikä määritellään päätösmuuttujien x_{ijk} ei-negatiivisuusehdolla (kaava 9). Mallin muuttujien ja parametrien selitteet esitetään taulukossa 2.

Yhteensopivuus

$$\sum_{k=1}^l x_{ijk} a_{ij} = 0 \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (7)$$

Kuljetettavuus

$$\sum_{i=1}^m x_{ijk} b_{jk} = 0 \quad j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, l \quad (8)$$

Ei-negatiivisuus

$$x_{ijk} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, l \quad (9)$$

Taulukko 2 Optimointimallin kaavojen selitteet

Z	Maksimoitava myyntikatetta kuvaava kokonaistavoite
x_{ijk}	Kysyntäpisteelle i tarjontapisteeltä j ajankohtana k toimitettu määrä (MWh)
p_{ik}	Kysyntäpisteen i hinta ajankohtana k (€/MWh)
c_j	Tarjontapisteen j yksikkölogistiikkakustannus (€/MWh/km)
k_{ij}	Kysyntäpisteen i ja tarjontapisteen j välinen etäisyys (km)
d_{ik}	Kysyntäpisteen i kysyntä ajankohtana k (MWh)
s_{jk}	Tarjontapisteen j tarjonta ajankohtana k (MWh)
a_{ij}	Binäärinen parametri kuvaa kysyntäpisteen i ja tarjontapisteen j yhteensopivuutta
b_{jk}	Binäärinen parametri kuvaa tarjontapisteen j kuljetettavuutta ajankohtana k

Lineaarisen optimointimallin määrittelyssä olennaista on löytää oikea tasapaino mallin tulkittavuuden sekä ratkaisun laskemisen helppouden välillä. Validointiaineiston data-analyysissä todettiin tarjontapisteiden ja kysyntäpisteiden määrän olevan suhteellisen suuri kuljetusongelmalle, mikä vaikuttaa päätösmuuttujien ja rajoitteiden kautta ongelman kokoon ja ratkaisun laskennalliseen vaativuuteen. Tässä tutkimuksessa ongelman koko on huomioitu yksinkertaistamalla rajoitteita sekä kohdefunktiota. Samalla malli on kuitenkin pyritty määrittämään ymmärrettävyydeltään ja virheiden havaitsemisen kannalta helppokäyttöiseksi.

Käytännössä tämä näkyy kohdefunktion yksinkertaistamisena suorituksen aikana kaavasta 4 poiketen muotoon, jossa myyntikate on laskettu ennen ongelman ratkaisua tarjonta- ja kysyntäpisteiden välille kaikille ajanhetkille. Varsinaisia rajoitteita on yksinkertaistettu yhdistämällä toimitettavuusrajoite osaksi tarjontarajoitetta hyödyntämällä optimointimallin monijaksaisuutta. Kullekin jaksolle ilmoitetaan vain uuden toimitettavissa olevan tarjonnan

määrä, joten tarjontapistettä ei voida toimittaa ennen kuin riittävän matala kosteuspitoisuus on saavutettu. Lisäksi manipuloidulla myyntikatelaskennan logistiikkakustannuksia, on ongelmaan mahdollista asettaa ”pehmeitä” rajoitteita kuljetusetäisyydelle sekä tarjontapisteen varastointiajalle kasvattamatta ongelman kokoa merkittävästi. Kuljetusetäisyyden rajoittaminen osana kustannuslaskentaa eliminoi lopullisesta ratkaisusta käytännön kannalta mahdottomat metsähakevirrat ja parantaa siten ratkaisun luotettavuutta.

Metsähakkeen toimitusketjun käytännön rajoitteet ovat vahvasti sidottuja kausivaihteluun ja muihin epävarmuutta sisältäviin tekijöihin, jolloin liian kireästi määritellyt rajoitteet voivat rajoittaa mallin hyötyä päätöksentekijälle. Tämä on huomioitu toimitusketjun ominaisuuksien mallintamisessa matemaattisiksi suhteiksi ja mallin rajoitteiksi. Kausivaihtelusta riippuvaiset rajoitteet on määritetty sallimaan ratkaisulle mahdollisimman suuri käypä alue, kuitenkin täyttäen riittävällä tasolla toimitusketjun asettamat rajoitteet. Nämä rajoitteet ovat selkeästi osoitettavissa päätöksentekijälle optimaalisen ratkaisun yhteydessä, jolloin mallin tulkinta ei häiriinny. Tämä kuitenkin sallii riittävästi joustoa mallin tuottamiin ratkaisuihin, jotta päätöksentekijälle tuotetaan käypä ratkaisu ja aidosti uusia päätösvaihtoehtoja.

4.6 Tulokset

Operaatioanalyysin seuraava vaihe on optimointiongelman ratkaisu. Validointiaineistolle muodostettu optimointiongelma koostuu 1 819 800 päätösmuuttujasta ja 216 760 rajoitteesta. Ongelman optimaalinen ratkaisu muodostuu 2 238 metsähakevirrasta ja käypä ratkaisu löytyy käyttötarkoituksen kannalta kohtuullisessa ajassa. Kohdefunktio muodostetaan myyntihinnan ja logistiikkakustannusten erotuksena. Optimaalisessa ratkaisussa keskimääräinen toimitetulla määrällä painotettu kuljetusetäisyys on noin 43,49 km. Validointiaineistolla ratkaistuna kysyntä ei tyydytä täysin ja noin 0,2 prosenttia kokonaiskysynnästä jää täyttämättä. Kysynnän alijäämää selittää tarjontapisteen saatavuuden tarkan mallintamisen haastavuus. Kausivaihtelun vaikutuksia toimitettavuuteen ja kuljetettavuuteen ei voida ennustaa absoluuttisella tarkkuudella. Tasapainoisessa ongelmassa yhdenkin tarjontapisteen kohdalle asetettu liian pessimistinen tai sitova rajoite voi tehdä kysynnän täydellisestä täyttymisestä mahdotonta.

Optimaalista ratkaisua arvioidaan retrospektiivisen testin avulla, jolloin optimoitua toimitussuunnitelmaa verrataan kohdeyrityksen viimeisimmän kokonaisen vertailukauden toteumaan. Optimoinnin avulla saavutetaan 7,48 kilometrin tai 14,7 prosentin parannus toimitusmäärällä painotettuun keskitoimitusetäisyyteen. Tämä tarkoittaa noin 4,9 prosenttia matalampia logistiikkakustannuksia koko toimituskauden ajalta. Mallin kohdefunktion maksimointi perustuu tutkimuksen tavoitteiden mukaisesti pitkälti kuljetusetäisyyksien minimointiin tulosta parantavana tekijänä, mutta eroavaisuuksia havaitaan eri alueiden ja tuotantoketjujen välillä. Optimaalinen ratkaisu verrattuna kohdeyrityksen validointiaineiston mukaiseen toteumaan esitetään taulukossa 3.

Taulukko 3 Optimointimallin tulokset

	Toteuma (km)	Optimoitu (km)	Erotus (km)	Muutos-%
Kuljetusetäisyys (km)	50,97	43,49	-7,48	-14,68

Taulukossa 4 esitetään optimaalisen ratkaisun vertailu toteumaan alueittain. Taulukosta havaitaan, että kaikilla alueilla saavutetaan huomattavasti lyhyempiä toimitusetäisyyksiä. Merkittävimmät hyödyt saavutetaan alueilla 1, 2 ja 4. Alueen 4 osuus on huomattava erityisesti, kun huomioidaan alueen jo valmiiksi lyhyet kuljetusetäisyydet. Optimointimallin hyödyt havaitaan voimakkaimmin alueilla, joissa kysyntäpisteiden määrä on suuri, mutta kysyntää hallitsevat yksittäiset merkittävästi keskimääräistä suuremman kokoluokan kysyntäpisteet. Tämä kysyntäpisteiden hallitseva asema heijastuu tulosten valossa myös nykyiseen logistiikan suunnitteluprosessiin. Optimointimalli määrittää metsähakevirrat kokonais kannattavuuteen perustuen ja käsittelee kysyntäpisteitä yhdenmukaisesti kysynnän määrästä riippumatta. Alueella 5 optimointimallin havaitut hyödyt ovat selvästi maltillisempia. Tämä selittyy pitkälti alueen pienellä osuudella sekä tarjonnasta että kysynnästä, mikä mahdollistaa alueella verrattain kustannustehokkaan logistiikkasuunnittelun myös ilman optimointia. Lisäksi alueen kysyntä- sekä tarjontapisteet ovat maantieteellisesti enemmän eristyksissä muista alueista.

Taulukko 4 Optimointimallin tulokset alueittain

	Toteuma (km)	Optimoitu (km)	Erotus (km)	Muutos-%
Alue 1	45,01	37,96	-7,05	-15,66
Alue 2	74,78	63,16	-11,62	-15,54
Alue 3	55,04	49,00	-6,03	-10,95
Alue 4	44,14	33,86	-10,27	-23,28
Alue 5	40,45	38,93	-1,52	-3,76

Optimoinnin hyötyjen havaitaan korostuvan optimoitavien virtojen määrän ja volyymin kasvaessa. Virtojen määrä on pitkälti seurausta tarjonta- sekä kysyntäpisteiden lukumäärästä alueella, mutta myös tuotantoketjujen välillä havaitaan eroja pisteiden määrän ja toimitettavan volyymin välillä. Havaittuun hyötyyn vaikuttavat luonnollisesti myös tarjonnan saatavuuteen ja yhteensopivuuteen liittyvät rajoitteet.

Optimoinnin ratkaisu tuottaa etuja sekä terminaali- että tienvarsituotantoketjussa. Terminaaliketjussa havaitaan kuitenkin merkittävästi suurempi suhteellinen hyöty verrattuna tienvarsiketjuun (taulukko 5). Myös tuotantoketjujen välisiä eroja selittää tarjonnan jakautuminen suurimmaksi osaksi terminaalitytuotantoketjuun. Terminaaliketjussa tarjonnan saatavuus on parempi ja volyymi keskittyy pienempään määrään tarjontapisteitä, mikä laajentaa tarjonnan käypää aluetta sekä optimoinnilla saavutettua hyötyä. Tienvarsihaketusketjussa matalampi volyymi ja heikompi saatavuus puolestaan rajoittavat optimoinnin hyötyjä. Tarjontapisteiden frekvenssi on kuitenkin suuri, mikä mahdollistaa myös tienvarsiketjussa huomattavan parannuksen retrospektiivisessä testauksessa. Optimointimallin ratkaisu on yhdenmukainen esitellyn teorian kanssa tuotantoketjuissa havaittujen kuljetusetäisyyksien suhteen: tienvarsiketju voidaan todeta myös pitkillä etäisyyksillä kustannustehokkaaksi ja terminaaliketjua suositaan lyhyillä etäisyyksillä lähellä kysyntäpisteitä.

Taulukko 5 Optimointimallin tulokset tuotantoketjuittain

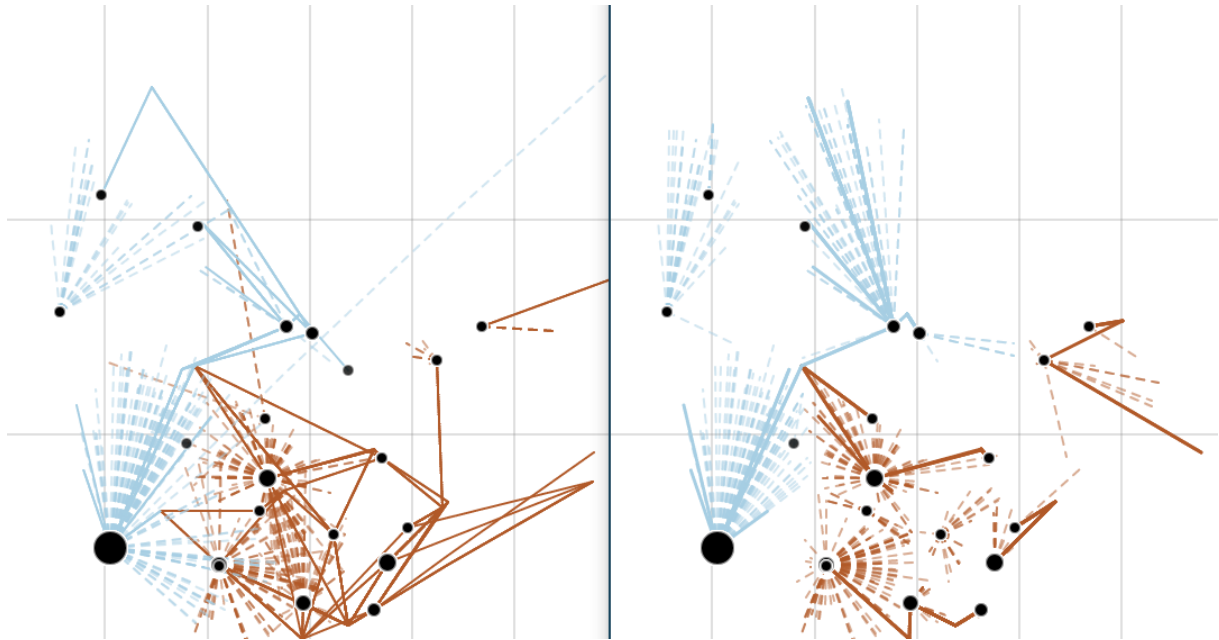
	Toteuma (km)	Optimoitu (km)	Erotus (km)	Muutos-%
Terminaali	45,12	36,43	-8,69	-19,26
Tienvarsi	61,26	55,96	-5,30	-8,65

Tuotteiden väliset eroavaisuudet optimoinnin tuloksissa selittyvät pitkälti eroavaisuuksilla käytetyissä tuotantoketjuissa sekä alueellisen yhteensopivaksi määritellyn kysynnän jakaumalla. Tuotteen 4 kohdalla optimoinnin etu on vähäinen matalasta volyymista johtuen ja vastaavasti tuotteen 1 suurella volyymilla saavutetaan optimoinnilla suurimmat edut.

Tuloksia analysoimalla havaitaan optimoinnin tuottamaan etuun vaikuttaviksi tekijöiksi erityisesti tarjonta- tai kysyntäpisteiden alueellinen lukumäärä ja toimitettu volyymi, joihin vaikuttaa välillisesti tarjontapisteiden jakautuminen eri tuotantoketjuille. Myös alueellinen kysynnän jakauma vaikuttaa saavutettuihin hyötyihin, sillä optimointimalli käsittelee kysyntäpisteitä saman arvoisina huolimatta kysynnän määrästä. Käytännössä optimaalisen ratkaisun saavuttamat hyödyt ovat seurausta seuraavista tekijöistä kohdeyrityksen logistiikan suunnittelussa:

1. Kysyntäpisteiden väliset tarpeettomasti risteävät metsähakevirrat (kuva 18)
2. Toiminta- ja vastuualueiden rajalla kokonaisedun vastainen toiminta (kuva 19)

Optimoinnin hyödyt näkyvät yhteistyön kehittymisenä raja-alueilla, mikä estää osaltaan risteävien virtojen syntymistä kysyntäpisteiden välille sekä parantaa paikallisen ja tarjonnan käyttöä alueiden välillä. Lähtökohtaisesti kaikki tarpeettomasti risteävät metsähakevirrat pidentävät toimitusetaisyyskäyviä eivätkä maksimoi paikallisen tarjonnan käyttöä. Kohdeyrityksen liiketoiminta-alueet jakautuvat pienemmiksi vastuualueiksi, joiden toimituksista vastaa operaatiopäällikkö. Näiden alueiden väliset maantieteelliset rajat eivät ole yhtä selkeitä kuin liiketoiminta-alueiden, mikä aiheuttaa risteäviä virtoja sekä korostaa yhteistyön merkitystä tarjonnan jakamisessa vastuualueiden välillä. Toteutuneiden toimitusten muodostamista virroista havaitaan myös käänteinen ongelma, jossa alueet ovat toisistaan tarpeettomasti eristyksissä. Tämä tarkoittaa, että optimaaliset toimitukset vaatisivat enemmän yli vastuualueiden rajojen tapahtuvaa yhteistyötä hyödyntääkseen paikallisen tarjonnan tehokkaammin. Optimaalisesta toimitussuunnitelmasta havaitaan siten ratkaisuja, jotka sekä käyttävät alueen omaa paikallista tarjontaa tehokkaammin että rikkovat vastuualueiden välisiä rajoja taatakseen kokonaisuuden kannalta tehokkaamman toiminnan. Alueiden välisen yhteistyön kehittyminen perustuu tiedon mallintamiseen ymmärrettävään muotoon optimoinnin kautta, mikä auttaa välttämään ongelmat uudelleenohjaamalla saatavilla olevan tarjonnan.

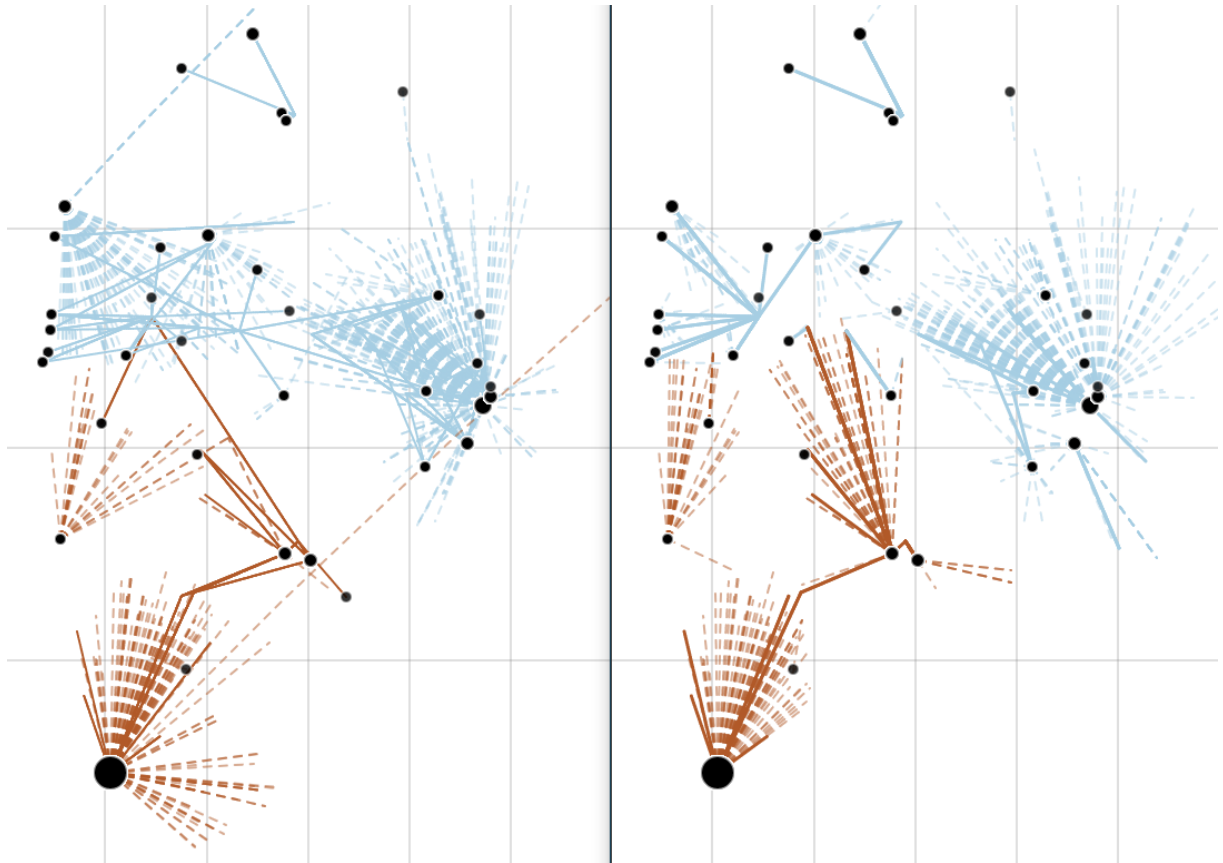


Kuva 18 Toteutuneet (vasen) ja optimoidut (oikea) metsähakevirrat alueella 1

Kuvassa 18 esitetään havainto tarpeettomasti risteävistä metsähakevirroista alueella 1. Tienvarsiketjun toimitukset on kuvattu katkoviivalla ja terminaaliketjut kiinteällä viivalla. Kysyntäpisteiden halkaisija kuvaa kysyntävolyymia ja virtojen väri logistiikkasuunnittelun vastuualueita. Kuvan perusteella havaitaan useiden kysyntäpisteiden metsähakevirtojen risteävän merkittävästi kohdeyrityksen toteutuneissa toimituksissa. Kuvan esimerkissä ongelma on havaittavissa sekä vastuualueiden välillä että saman vastuualueen sisällä. Vastaavia havaintoja voidaan nostaa esille käytännössä kaikilla alueilla vaihtelevin määrin, mutta ongelmat keskittyvät erityisesti alueille, joiden kysyntä- ja tarjontapisteiden määrä on suuri ja maantieteellinen jakauma tiheä.

Optimointimallille asetettujen käytännön rajoitteiden valossa virtojen tulisi ristetä vain tilanteessa, jossa tarjonnan saatavuus tai yhteensopivuus estää toimituksen tarjontapisteeltä lähimpään kysyntäpisteeseen. Optimoitu ratkaisu vähentää merkittävästi risteävien virtojen määrää tyydyttäen kuitenkin tarjontapisteiden saatavuudelle ja yhteensopivuudelle asetetut rajoitteet. Optimoidussa ratkaisussa huomionarvoista on yksittäisten terminaalien metsähakevirtojen kohdistuminen hyvin pienelle joukolle kysyntäpisteitä. Terminaaliketjun toimintasäde on lyhyempi terminaalien palvellessa vain lähimpiä kysyntäpisteitä. Tämä havainnollistaa taulukossa 5 esitettyjä tuotantoketjukohtaisia tuloksia, joissa optimoinnin

suurin hyöty havaittiin terminaaliketjussa. Tienvarsiketjussa risteäviä materiaalivirtoja havaitaan visuaalisessa tarkastelussa vähemmän, minkä lisäksi virtojen volyymi on huomattavasti matalampi.



Kuva 19 Toteutuneet (vasen) ja optimoidut (oikea) metsähakevirrat kahden vastuualueen välillä

Kohdeyrityksen kahden vastuualueen väliset metsähakevirrat esitetään kuvassa 19. Tuloksista havaitaan optimaalisen ratkaisun sallivan huomattavasti enemmän alueiden välisiä virtoja. Kuvan esimerkissä kahden eri alueen kysyntä tyydyttyy saman alueen tarjontapisteistä, jolloin alueellista tarjontaa hyödynnetään todellisuudessa tehokkaammin. Lisäksi alueiden sisäisten risteävien virtojen määrä on minimoitu ja havaittavissa on myös siniselle alueelle muodostuvat keskittyneemmät terminaaliketjun toimitukset. Esimerkin tapaus on yhteydessä kuvasta 18 tehtyyn havaintoon. Ohjaamalla sinisen alueen tarjontapisteitä ruskean alueen käyttöön mahdollistetaan risteävien virtojen minimoiminen ensimmäisessä esimerkissä. Ilman logistiikan suunnittelua rajoittavia liiketoiminta- ja vastuualueiden rajoja kysyntäpisteille tarjotaan suurempi joukko käyviä tarjontapisteitä. Tämä johtaa toimitusetäisyyksien

minimoimiseen sekä huomioi paikallisen tarjonnan käytön heijastusvaikutukset koko lämmityskauden ajalta myös muille alueille ja kysyntäpisteille.

Käytännössä on todennäköistä, että risteäviä virtoja ei voida estää täysin optimoinnin tuloksen mukaisesti. Kun toimituksia mallinnetaan lineaarisesti, on otettava huomioon, että esimerkiksi tieverkoston rakenne voi tietyillä alueilla rajoittaa mahdollisuuksia optimaalisen ratkaisun mukaiseen toteutukseen. Teoriaosuudessa havaittiin metsähakkeen toimitusketjun perustuvan useilta urakoitsijoilta toimittajan ostamiin palveluihin. Toimitusketju toimii siten rakenteensa vuoksi myös urakoitsijoiden kapasiteetin ehdoilla. Kysynnän kausivaihtelu tekee kapasiteetin hallinnasta ja sen mallintamisesta haastavaa, minkä vuoksi on todennäköistä, etteivät optimaalisen ratkaisun mukaiset metsähakevirrat ole täysin toistettavissa käytännön toimitusketjussa. Tuloksia arvioidessa on siis tiedostettava, että metsähakevirtoina esitetty logistiikka kostuu todellisuudessa lukuisista erillisistä kuormista. Myös urakointiverkosto pyrkii optimoimaan oman toimintansa kannattavuutta, mikä vaikuttaa usein negatiivisesti kohdeyrityksen logistiikan kannattavuuteen estäen optimaalisen toimitussuunnitelman täydellisen toteutumisen.

Edellä mainituille havainnoille analysointiin suunnitteluprosessista juurisyitä osana optimointimallin käytön arviointia kohdeyrityksen logistiikkasuunnittelussa. Toimitussuunnittelun mallintaminen kehittää tiedon hyödyntämistä ja hallintaa prosessissa sekä tukee päätöksentekoa. Optimointimalli mahdollistaa toimitusprosessin aikaisemmista vaiheista perityn tiedon uudelleenmäärittelyn ja haastaa vakiintuneet oletukset kannattavuudesta hakkeen logistiikassa. Siten optimoinnin kautta saavutettujen etujen selittäviksi tekijöiksi nousivat seuraavat:

1. Toimitusprosessin aikaisemmista vaiheista perityn tiedon hyödyntäminen lähtötietona toimitustensuunnittelussa
2. Hajautetun päätöksenteon kannattamattomat toimintamallit ja niiden jatko vaikutukset
3. Yksittäisten metsähakevirtojen kannattavuuden priorisointi alueellisesti tai kysyntä- ja tarjontapistekohtaisesti
4. Vakiintuneet logistiikan kannattavuusoletukset.

Tarjontapisteiden ja toimituksiin vaikuttavien tekijöiden suuri määrä vaikeuttaa suunnittelua pitkällä aikavälillä kokonaisuuden näkökulmasta ilman päätöksentekoa tukevan tiedon mallinnusta. Olemassa olevan tiedon haastaminen, tarkistaminen tai uudelleenmäärittely ei ole käytännöllisesti toteutettavissa osana nykyistä suunnitteluprosessia, sillä aikaisemmista hankinta- ja toimitusprosessin vaiheista perityn tiedon määrä ja rooli suunnittelussa on merkittävä. Tämä on erityisen haitallista, sillä valtaosa tiedosta on peräisin energiapuun hankintaprosessista. Hyödynnetty tieto perustuu siten eri ajanhetkessä tehtyihin oletuksiin kannattavuudesta ja logistiikkasuunnittelun tavoin sisältää omia hajautetulle päätöksenteolle ominaisia alueellisia priorisointejaan.

Kohdeyrityksen maantieteellisesti laaja toiminta on tähän asti vaatinut hajautettua päätöksentekoa, mikä tarjoaa ketteryttä toimitusten suunnittelussa sekä päätöksenteossa erityisesti lyhyellä aikavälillä. Kääntöpuolena optimointiongelman muuttujien määrä tekee koko lämmityskauden suunnittelusta haastavaa ja reaktiivista ilman täyttä käsitystä päätösten heijastusvaikutuksista koko lämmityskauteen. Tämä korostaa mallinnuksen merkitystä kokonaisuuden hallinnassa ja toiminnan kannattavuuden hahmottamisessa. Tiedon mallinnus lievittää kohdeyrityksen logistiikkasuunnittelun maantieteellisten vastuu- ja asiakasalueiden vaikutusta suunnittelussa. Alueellisen tarjonnan tehokas hyödyntäminen vaatii tehokasta tiedon vaihtoa alueiden välillä sekä käsitystä päätöksenteon vaikutuksista koko toimituskauteen. Tiedon mallintaminen optimoinnin menetelmin tarjoaa näkemyksen siitä, miten tarjonta tulisi jakaa alueiden välillä ja millaisia heijastusvaikutuksia päätöksillä on. Optimointimallin hyödyntäminen mahdollistaa tiiviimmän yhteistyön alueiden välillä ja keskittää päätöksentekoa.

Yksittäisten metsähakevirtojen vaikutuksia kokonaiskannattavuuteen on haastavaa arvioida tai havainnollistaa ilman mallinnusta, jolloin on luotettava vakiintuneisiin oletuksiin kannattavista toimintamalleista kullakin vastuualueella. Tämä voi johtaa kokonaiskannattavuutta rajoittaviin päätöksiin toimitusten hallinnassa, joiden vaikutus kertaantuu toimituskauden edetessä tarjonnan kausiluontoisuuden vuoksi. Ilmiö on havaittavissa erityisesti volyymitaan suurten kysyntäpisteiden läheisyydessä, kun yksittäisten pisteiden toimituksia priorisoidaan tai koko logistiikkasuunnittelu rakentuu niiden ympärille. Ilmiöt ovat esillä erityisesti, kun kysyntä ei jakaudu tasaisesti vaan esiintyy kysyntäpiikkeinä, jotka kuormittavat logistiikkaketjun

kapasiteettia voimakkaammin. Edellä mainittujen syiden seurauksena voi olla myös edullisten varastopisteiden suosiminen lyhyen aikavälin edun saavuttamiseksi kokonaiskannattavuuden kustannuksella. Näissä tilanteissa optimointimalli tuo näkyvyyttä koko toimituskauden ajalle eikä priorisoi yksittäisen jakson tai alueen kannattavuutta. Lisäksi on tyypillistä, että tietyillä alueilla on vakiintuneita toimintamalleja, jotka säilyvät muuttumattomina tai tarkistamattomina. Optimointimalli tuo esille päätösten vaikutukset pitkällä aikavälillä ja ehdottaa uusia toimintamalleja.

4.7 Mallin validointi

Tässä tutkimuksessa rakennetun optimointimallin validointi perustuu rakenteelliseen validointiin sekä historiallista dataa hyödyntävään retrospektiiviseen testaukseen. Mallin määrittely pohjautui teoriaosuuden kirjallisuuteen sekä kohdeyrityksen asiantuntijoiden kokemukseen. Kohdeyrityksen logistiikkasuunnittelusta vastaavat päätöksentekijät pidettiin osallisina mallin rajoitteiden määrittelyssä, jotta mallin ratkaisu huomioisi käytännön haasteet ja vastaisi mallinnettua todellisuutta tavalla, joka hyödyttää päätöksentekijää mahdollisimman paljon. Mallin tuloksia arvioitiin eri vaiheissa osana tulosten validointia, minkä seurauksena mallin käytännöllisyyttä vahvistettiin asettamalla pehmeitä rajoitteita toimitusetäisyyksille. Retrospektiivisen testauksen perusteella lineaarinen optimointi tarjoaa merkittävän hyödyn metsähakkeen toimitusten suunnittelussa. Testauksen tuloksia tarkastellessa optimoitujen metsähakevirtojen voidaan todeta noudattavan määritellyn mallin rajoitteita tarkoitetulla tavalla ja tulosten olevan ennakoitavia. Testaus toi esille optimoinnin käytännössä tarjoamat hyödyt sekä nykyisen suunnitteluprosessin heikkoudet ja niiden juurisyyt. Mallin laajempaa tuloksellista analyysia rajoittavat tutkimuksen ajankohtana saatavilla olevat tiedot, mikä estää mallin testaamisen tuoreella datalla. Lopullinen systemaattinen validointi sijoittuu siten operaatioanalyysille tyypillisesti ratkaisun implementointiin kohdeyrityksessä.

4.8 Postoptimaalinen analyysi

Optimointimallin ratkaisun postoptimaalinen analyysi koostuu mallin herkkyysoanalyysistä ja duaalimuuttujien taloudellisesta analyysistä. Herkkyysoanalyysi keskittyy tarkastelemaan optimaalisen ratkaisun herkkyyttä muutoksille mallin parametrien arvoissa sekä rajoitteiden

side-ehdoissa. Mallin herkkyyttä tarjonta- ja kysyntärajoitteiden muutoksille ei tutkita. Tässä tutkimuksessa keskitytään tutkimaan logistiikkakustannusten mallinnuksen sekä varastojen kuljetettavuus- ja yhteensopivuusrajoitteiden vaikutusta optimaaliseen ratkaisuun.

4.8.1 Herkkyyksianalyysi

Kustannusherkkyyksianalyysissa mallin logistiikkakustannukset määrittävän funktion kertoimia säädetään ja ongelma ratkaistaan uudelleen uusilla lähtötiedoilla. Tämän tutkimuksen kannalta on kiinnostavaa tarkastella skenaarioita, joissa kaikille tuotantoketjuille asetetaan yhdenmukaiset kustannukset. Erilaisten kustannusskenaarioiden tarkastelu on tärkeää, jotta voidaan tutkia mallin herkkyyttä muutoksille parametreissa erityisesti tuotantoketjujen käytön suhteen. Herkkyyksianalyysi antaa tietoa päätöksentekijältä vaaditun tarkkuuden tasosta mallin lähtötietoja määritettäessä. Analyysin tavoitteena on selvittää miten eri lähtötiedoilla ratkaistut tulokset vertautuvat toisiinsa, ja parantaa siten mallin tulosten ymmärrettävyyttä päätöksentekijälle.

Optimaalinen ratkaisu ei ole herkkä kohtuullisille muutoksille kustannuksissa. Kustannusskenaario yhdenmukaisilla logistiikkakustannuksilla eri tuotantoketjujen välillä tuotti täysin vastaavan keskitoimitusetaisyyden kuin alkuperäinen ratkaisu. (taulukko 5) Ratkaisun tarkempi tarkastelu osoittaa kustannusmuutoksen vaikuttaneen optimaaliseksi määritettyihin yksittäisiin virtoihin ohjaamalla terminaaliketjun kautta entistä pidempiä toimituksia. Tässä kustannusskenaariossa eri tuotantoketjut ovat yhtä kannattavia kaikilla toimitusetaisyyksillä. Tuotantoketjuittain skenaarion tuloksia analysoidessa huomataan, että koko optimoinnin kannalta kyse on vain 0,01 prosentin erosta verrattuna alkuperäiseen ratkaisuun.

Taulukko 6 Kustannusparametrien herkkyyksianalyysin tulokset

	Optimoitu (km)	Muutos-%
Yhteensä	43,49	0,00
Terminaaliketju	42,91	-0,01
Tienvarsi	42,95	-0,01

Kuljetettavuus- ja yhdensopivuusrajoitteet ovat sitovia rajoitteita, joten mallin toiminnan kannalta on kiinnostavaa tutkia, kuinka voimakkaasti rajoitteiden vapauttaminen vaikuttaa optimaaliseen tulokseen. Sitovien rajoitteiden vapauttaminen kasvattaa mallin käypien ratkaisujen joukkoa, minkä tulisi parantaa nykyistä optimaalista ratkaisua.

Mallin optimaalinen ratkaisu on lähes yhtä herkkä yhteensopivuusrajoitteen vapauttamiselle, kuin se on kuljetettavuusrajoitteen vapauttamiselle. Kuljetettavuusrajoitteen vapauttaminen parantaa optimaalista kohdefunktion arvoa noin 0,1 prosenttia ja lyhentää keskimääräistä painotettua toimitusmatkaa 1,3 prosenttia (taulukko 7).

Taulukko 7 Kuljetettavuus- ja yhteensopivuusrajoitteiden herkkyyksianalyysin tulokset

	Optimoitu (km)	Muutos-%
Kuljetettavuus (yhteensä)	42,91	-1,33
Kuljetettavuus (terminaaliketju)	36,55	0,32
Kuljetettavuus (tienvarsi)	51,15	-3,24
Yhteensopivuus (yhteensä)	42,95	-1,24
Yhteensopivuus (terminaaliketju)	36,56	0,36
Yhteensopivuus (tienvarsi)	54,23	-3,09

Eroavaisuudet skenaarioiden välillä ovat pienempiä kuin skenaarioiden ja alkuperäisen ratkaisun välillä. Sitovan yhteensopivuusrajoitteen vapauttamisen vaikutukset optimaaliseen ratkaisuun ovat odotetusti verrattavissa kuljetettavuusrajoitteeseen. Molemmat rajoitteet koskettavat pääasiassa tienvarsihaketusketjuun kuuluvia tarjontapisteistä ja siten sitovista rajoitteista löytyy todennäköisesti päällekkäisyyksiä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että yhteensopivuuden suhteen herkkät kysyntäpisteet ovat myös kuljetettavuuden osalta rajoitettuja. Molemmissa skenaarioissa terminaaliketjun toimitusetäisyydet kasvavat hieman, mutta tienvarsiketjussa havaitaan merkittävä lasku keskimääräisessä toimitusetäisyydessä.

4.8.2 Slack-muuttujien ja varjohintojen analyysi

Rajoitteen sitovuutta tarkastellaan rajoitteiden yli- ja alijäämän perusteella. Tämän tutkimuksen perusskenaarion optimaalisen ratkaisun rajoitteiden yli- ja alijäämä esitetään taulukossa 8.

Sitovan rajoitteen yli- tai alijäämä on aina 0. Ei-sitovalla rajoitteella havaitaan yli- tai alijäämää, joka kertoo rajoitteen käyttämättömien resurssien määrän. Yhtälömuotoiset rajoitteet, kuten tässä tutkimuksessa kuljetettavuus- ja yhteensopivuusrajoitteet, ovat aina sitovia ja sallivat vain yhden mahdollisen toteuman. Tämän tutkimuksen optimointiongelmassa yli- tai alijäämää havaitaan kysyntä- ja tarjontarajoitteissa.

Taulukko 8 Rajoitteiden yli- ja alijäämät

	Alijäämä (%)	Ylijäämä (%)
Kysyntä	-0,19	0
Tarjonta (Lopputilanne)	0	0,19
Kuljetettavuus	0	0
Yhteensopivuus	0	0

Optimoinnin tulosta tarkastellessa havaitaan, että asetettujen rajoitteiden alaisena kysyntää ei kyetä täyttämään täysin. Tarkastelemalla rajoitteiden ylijäämämuuttujia voidaan vahvistaa sama havainto. Tämä ilmenee kysynnän alijäämänä, joka voidaan paikallistaa yhteen kysyntäpisteeseen ja ajanhetkeen. Tarjonnan ylijäämiä havaitaan enemmän, sillä mallin tarjonnan on mahdollista jakautua usealle jaksolle. Ylijäämää syntyy jokaisen jakson lopussa, jos varasto on määritetty toimitettavaksi ja tarjontapistettä ei ole käytetty tyhjäksi. Tarjonnan ylijäämän tarkastelu vertailukelpoisesti vaatii optimointi-ikkunan lopun tilanteen tarkastelua. Validointiaineisto muodostaa tasapainoisen optimointiongelman, jossa tarjonta vastaa määrältään kysyntää, minkä seurauksena myös tarjonnan ylijäämä vastaa kysynnän alijäämää. Ylijäämä sijoittuu neljään tarjontapisteseen, joiden kaikkien kuljetettavuus on rajoitettu tiettyihin jaksoihin. Tarjonnan ylijäämä selittyy alueellisen tarjonnan saatavuuden tai sopivien raaka-ainejakeiden vajauksella kannattavien toimitusetäisyyksien päässä kysyntäpisteestä.

Primääritehtävän lisäksi on mahdollista tarkastella duaalitehtävän muuttujia, jotka on määritetty jokaiselle mallin rajoitteelle. Duaalimuuttujien eli varjohintojen kautta voidaan tulkita yksittäisten rajoitteiden muutosten vaikutuksia optimaaliseen ratkaisuun. Maksimointiongelmissa varjohinta kuvaa optimaalisen ratkaisun kasvua, kun rajoitetta muutetaan yhdellä yksiköllä muiden rajoitusten pysyessä ennallaan. Ei-sitovan rajoitteen muuttaminen ei vaikuta optimoinnin tuloksiin, joten epäaktiivisten rajoitteiden varjohinta on

luonnollisesti nolla. Tämän tutkimuksen malliin sisältyi 216 760 rajoitetta, joten rajoitusten varjohintojen yksityiskohtainen tarkastelu ei ole käytännöllistä, mutta auttaa määrittämään mallin tulokseen eniten vaikuttavat tekijät ja täydentää herkkyyksianalyysia.

Monijaksoisessa ongelmassa on odotettua, että suurimmat varjohinnat havaitaan kysyntärajoitteilla erityisesti, kun huomioidaan mallin kysynnän alijäämä. Riippuen järjestelmän tilasta tiettyjen kysyntäpisteiden kysynnän täyttäminen on kannattavampaa kuin toisten, ja eroja voi syntyä myös jaksojen välille. Käytännössä kysynnän varjohintojen tulkinta voi olla haastavaa, sillä kysyntäpisteille määritetyt varjohinnat sijoittuvat myös jaksoille, joille kysyntää ei ole määritelty tai kysyntää ei ole odotettavissa. Kuljetettavuusrajoitteet selittävät optimaalisen ratkaisun tarjonnan ylijäämää ja niiden rentouttaminen pienentää kyseistä ylijäämää, joten varjohintojen voidaan odottaa olevan huomattavia. Suurimmat varjohinnat ratkaisussa kohdistuvat vain kesällä kuljetettavilla tienvarsivarastoille. Yksittäisten yhteensopivuus rajoitteiden vaikutus optimaaliseen ratkaisuun ei ole yhtä merkittävä varjohintojen analysoinnin perusteella.

4.9 Mallin jatkojalostus

Aiemmin todettiin tutkimuksen tekohetken rajoittaneen optimointimallin tuloksellista validointia uudella datalla. Tässä luvussa esitellään kohdeyrityksen operaatiopäälliköiden käytössä havaitut alustavat jatkokehityksen aiheet ja niihin esitetyt ratkaisut, joiden systemaattinen validointi ei tämän tutkimuksen ajanhetkenä ollut mahdollista.

Päätöksentekijän käytössä havaittiin jatkokehityksen kohteeksi toimitusketjun urakointikapasiteetin huomioiminen suunnittelussa. Kohdeyrityksen urakoitsijaverkoston kapasiteetti on rajallista kysynnän voimakkaan kausivaihtelun seurauksena. Käytetyt tuotantoketjut rasittavat kapasiteettia eri tavoilla ja tienvarsitoimitusten kuormitus havaitaan teorian mukaisesti suurempana erityisesti kysynnän huippuhetkinä. Terminaaliketjussa kapasiteetin käyttöaste on korkeampi, sillä tuotantoketjun vaiheet eivät ole riippuvaisia toisistaan eikä jatkuvia kaluston siirtoja tarvita. Kysynnän huippuhetkinä talvella suositaan terminaaliketjun käyttöä. Siten toimitusketjun urakointikapasiteettia voidaan hallita rajoittamalla käytettyjä tuotantoketjuja mallin tarjontapisteille määritetyn varastotyypin kautta.

Käytännössä tämä kiteytyy kysynnän huippujaksoina terminaaliketjun käytön painottamiseen erityisesti suuren volyymin kysyntäpisteissä. Painottaminen toteutetaan määrittämällä kysyntäpistekohtaisesti alaraja terminaaliketjun kautta toimitetulle määrälle (kaava 10).

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} t_j - \sum_{j=1}^n x_{ijk} d_{ik} \geq 0 \quad i = 1, \dots, m; k = 1, \dots, l \quad (10)$$

Kaava 10 kuvaa terminaalitoimituksille asetettua rajoitetta, joka auttaa mallia huomioimaan aluekohtaiset urakointikapasiteetin rajoitteet. Rajoite huomioi tuotantoketjun binäärisellä parametrilla t_j , joka saa terminaalivaraston kohdalla lukuarvon 1 ja tienvarsivaraston kohdalla lukuarvon 0. Kysyntäpistekohtaista kapasiteettia valvoo parametri d_{ik} , joka ilmaisee päätöksentekijän määrittämän osuuden terminaalitoimituksille kysyntäpisteelle i ajankohtana k . Rajoite määrittää terminaalitoimitusten volyymiksi vähintään päätöksentekijän asettaman osuuden kokonaistoimituksista.

Tämän tutkimuksen teoriaosuudessa yhdeksi metsähakkeen laatu- ja kustannustekijäksi todettiin hakkeen jalostusarvoa laskevat kuiva-ainetappiot, jotka ovat seurausta energiapuun liian pitkäaikaisesta varastoinnista. Kuiva-ainetappioita pyritään minimoimaan valvomalla varastojen kiertoaikaa sekä toimitusjärjestystä. Validointiaineiston tasapainoisessa ongelmassa koko tarjonta toimitetaan kauden aikana, jolloin varastonkierron priorisointi ei ole yhtä olennaista. Aihe koskettaa vahvasti myös tämän tutkimuksen kohdeyritystä, jonka toimitukset eivät normaalitilanteessa muodosta tasapainoista ongelmaa. Varastoinnin kesto voidaan sisällyttää halutulla tarkkuudella osaksi mallin pehmeitä rajoitteita. Käytännössä liian pitkäaikaisten tarjontapisteiden priorisoiminen tapahtuu määrittämällä tietty raja, jonka ylittävät tarjontapisteet nostetaan toimitusjärjestyksessä ensimmäisiksi kustannuksia säättämällä parantaen varastoerän kannattavuutta. Varastoinnin kestoa hallitsemalla hillitään metsähakkeen kuiva-ainetappioita ja optimoidaan toimitusten kosteuspitoisuutta, mikä mahdollistaa suuremman energiasisällön ja energian tuoton samoista tarjontapisteistä.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli mallintaa metsähakkeen logistiikkaa määrittelemällä lineaarinen optimointimalli, tarkastella optimoinnin hyötyjä kohdeyrityksessä sekä arvioida mallin käyttöä osana kohdeyrityksen toimitusprosessia. Tutkimuksessa keskityttiin lineaarisiin malleihin, jotka tukevat erityisesti taktista päätöksentekoa. Teoriaosuudessa selvitettiin metsähakkeen toimitusketjujen ominaispiirteet, kustannus- ja laatutekijät sekä logistiikan suunnitteluun vaikuttavat tekijät. Aiheeseen liittyvästä teoriasta luotiin alustavat rajoitteet optimointiongelmalle, joita täydennettiin ja jalostettiin kohdeyrityksen asiantuntijoiden vapaamuotoisilla haastatteluilla. Ongelman määrittelyssä hyödynnettiin kohdeyrityksen prosesseista saatavilla olevaa tietoa, joka edelleen jalostettiin asiantuntijoiden palautteen perusteella. Mallin validointi pohjautui historialliseen toteumaan perustuvaan laskenta-aineistoon. Optimoinnin kohdefunktioksi asetettiin taloudellinen tavoite, joka palvelee samanaikaisesti ympäristöllistä tavoitetta toimitusetäisyyksiä minimoiden. Lineaarisen ohjelmoinnin teorian mukaisesti tunnistetut tavoitteet ja rajoitteet käännettiin matemaattisiksi suhteiksi. Lopputuloksena saavutettiin optimointimalli, joka kuvaa kohdeyrityksen logistiikan toimintaympäristöä ja tuottaa ratkaisunaan monijaksoisen toimitussuunnitelman tukemaan päätöksentekoa logistiikkasuunnittelussa.

Edellä mainittujen tavoitteiden mukaisesti asetettiin kaksi tutkimuskysymystä. Empiirisen tarkastelun avulla pyrittiin vastaamaan kysymyksiin:

1. Millaisia hyötyjä matemaattisen optimoinnin avulla saavutetaan metsähakkeen toimitusketjussa?

Optimoinnin tulosten analyysin perusteella voidaan todeta, että lineaarisen optimoinnin avulla on mahdollista saavuttaa huomattavia säästöjä metsähakkeen logistiikkakustannuksissa. Kustannussäästöt perustuvat toimitusetäisyyksien minimointiin toimituskauden aikana (1) vähentämällä risteäviä metsähakevirtoja sekä (2) kehittämällä liiketoiminta- ja vastualueiden välistä yhteistyötä. Näillä tekijöillä havaittiin olevan merkittävä vaikutus sekä metsähakkeen keskimääräiseen toimitusetäisyyteen että paikallisen tarjonnan tehokkaaseen hyödyntämiseen

toimituskauden aikana. Kaiken kaikkiaan validointiaineiston optimoinnilla saavutettiin 14,7 prosenttia lyhyemmät keskimääräiset toimitusetaisyudet, mikä vastaa noin 4,9 prosenttia matalampia logistiikkakustannuksia. Optimaalisesta ratkaisusta tehdyt havainnot vastaavat kuljetusongelman geneeristä ratkaisua. Tämän vuoksi on tunnistettava myös nykyisessä prosessissa ne juurisyyt, jotka johtavat kohdeyrityksessä edellä mainittuihin ongelmiin, ja kuinka lineaarista optimointia voidaan hyödyntää niiden ratkaisemisessa tai lievittämisessä. Optimoinnin hyötyjen juurisyiksi nostettiin seuraavat:

1. Hankintaprosessista perityn tiedon käyttö lähtötietona logistiikkasuunnittelussa
2. Hajautetun päätöksenteon kannattamattomat toimintamallit ja niiden jatko vaikutukset
3. Yksittäisten metsähakevirtojen kannattavuuden priorisointi
4. Vakiintuneet logistiikan kannattavuusoletukset.

Kohdeyrityksen logistiikkasuunnittelussa on käytössä tuntuva määrä tietoa, jonka hyödyntäminen tehokkaasti on haastavaa tai mahdotonta ilman tiedon mallintamista. Suunnitteluprosessi on osa laajempaa hankinta- ja toimitusprosessia. Seurauksena kohdeyrityksen toiminnan laajuudesta ja varastopisteiden lukumäärästä logistiikkasuunnittelu nojaa vahvasti prosessin aikaisemmissa vaiheissa määriteltyyn tietoon. Käytännössä optimointimallin voidaan nähdä uudelleenmäärittelevän logistiikkasuunnittelun lähtötietoja, mikä avaa metsähakkeen logistiikan päätöksentekijöille uutta tietoa sekä toimintaehdotuksia prosessiin.

Hajautettu päätöksenteko mahdollistaa logistiikkasuunnittelun ketteryyden, mutta samalla rajoittaa suunnitteluprosessissa tiedon vaihtoa. Optimointimalli tarjoaa vaihtoehtoisen näkemyksen tarjonnan jakamisesta liiketoiminta- ja vastualueiden välillä, keskittäen samalla päätöksentekoa ja kehittämällä alueiden välistä yhteistyötä sekä tiedon liikkumista.

Monijaksoisessa suunnittelussa yhtenä haasteena on hahmottaa yksittäisten päätösten vaikutuksia kannattavuuteen koko toimituskauden aikana. Vastaavasti tiettyjen asiakaslaitosten tai alueiden priorisointi voi tapahtua kokonaisuuden kustannuksella, sillä vaihtoehtoista toimintatapaa on käytännössä mahdoton todentaa toimivaksi. Tällöin toimitusketjun kriittisten laatutekijöiden tai kannattavuuden lyhyen aikavälin priorisointi voi vaikuttaa järkevältä. Optimointimalli tuottaa ymmärrettävää tietoa toimitusketjun pitkän aikavälin kannattavuudesta

auttaen välttämään edellä mainitut skenaariot suunnittelussa ja hahmottamaan uusia vuorovaikutussuhteita.

Nykyisessä muodossaan metsähakkeen logistiikan suunnittelussa on pitkälti luotettava kannattavuuden osalta vakiintuneisiin oletuksiin sekä toimintatapoihin. Vaihtoehtoisten ratkaisujen vaikutuksia kokonaiskannattavuuteen on haastavaa arvioida. Lineaarinen ohjelmointi ja kuljetusongelman mallinnus tarjoavat todennetun menetelmän metsähakkeen logistiikan tehokkaaseen mallintamiseen huomioiden riittävällä tarkkuudella taktisen tason suunnitteluun vaikuttavat tekijät. Optimointimalli tuottaa päätöksentekoon uutta laadukasta tietoa, joka perustuu tarkasti määriteltyyn kuvaukseen metsähakkeen logistiikasta kohdeyrityksessä. Mallinnus kehittää toiminnan ennakoitavuutta ja edistää logistiikan suunnitteluprosessin järjestelmällisyyttä sekä jäljitettävyyttä. Ennen kaikkea optimointimalli tarjoaa uusia vaihtoehtoisia toimintatapaehdotuksia ja todentaa niiden kannattavuuden päätöksentekijälle ymmärrettävällä tavalla.

2. Miten optimointimallin tuloksia voidaan hyödyntää logistiikkasuunnittelussa?

Metsähakevirtojen optimointimalli on mahdollista tuoda olennaiseksi osaksi logistiikan suunnitteluprosessia sekä laajempaa tilaus- ja toimitusprosessia. Mallin pääasiallinen käyttökohde havaitaan varastopisteille hankintaprosessissa osoitettujen määräraikkojen uudelleenmäärittelyssä ja materiaalivirtojen aikataulutuksessa myyntisopimusten mukaisesti. Optimointi päivittää suunnittelun lähtötiedot ja tarjoaa niiden pohjalta kuvauksen kannattavista toimintatavoista. Lopputuloksena on siten malli, joka tuottaa päätöksentekijöille alustavan ehdotuksen tai rungon toimituskauden suunnitelmasta. Tätä ehdotusta voidaan hyödyntää pohjana lopullisen suunnitelman rakentamisessa ja validoinnissa.

Mallin ratkaisun tulkitseminen ja muokkaaminen toteutetaan osana logistiikkasuunnittelusta vastaavien operaatiopäälliköiden normaalia suunnitteluprosessia, jossa lyhyen aikavälin viikko- ja päivätason suunnitteluvastuu jää yhä operaatiopäälliköille. Mallia on mahdollista hyödyntää jatkuvasti läpi toimituskauden päivittämään metsähakevirtojen suuntia optimoinnin lähtötietojen muuttuessa. Tämä auttaa hahmottamaan toimitusketjun pitkän aikavälin kannattavuutta sekä päätösten syy-seuraussuhteita ja tuo ajantasaista tietoa päätöksentekoon.

Optimaalisia ratkaisuja voidaan lisäksi hyödyntää jatkuvana vertailukohtana suunnittelun onnistumiselle, joka palvelee kahta tarkoitusta: (1) tuo esille syitä poikkeamille optimaalisesta tavasta toimia ja (2) paljastaa heikkouksia ja jatkokehityskohteita optimointimallista.

Validoitu optimointimalli löytää lisäksi käyttökohteita logistiikkaketjun kannalta kriittisestä skenaarioanalyysistä. Logistiikkavaatimusten simulointia voidaan hyödyntää hahmottamaan kapasiteetin tarvetta kaluston riittävyyden varmistamiseksi sekä mallintamaan tarjonnan tilaa tulevaisuudessa. Tietoa toimituskauden jälkeisestä tarjonnasta voidaan hyödyntää tilaus-toimitusprosessin alussa hankintasuunnittelussa ja potentiaalisten alivarastotilanteiden kehittymisen havaitsemisessa. Mikäli mallin tulosten todetaan vastaavan mallinnettua järjestelmää riittävällä tarkkuudella, on myös taloudellinen ennustaminen arvokas käyttökohde optimointimallille. Erityisesti kysyntään ja tarjontaan liittyvä skenaarioanalyysi voi osoittautua hyödylliseksi tarjonnan varmistamisessa epävarmoissa olosuhteissa. Varsinaisen globaalien optimien löytämisen lisäksi lineaarista optimointia on hyödynnetty allokoidaan resursseja tietyn päätöksentekijän asettaman tavoitteen mukaisesti. Tämä tavoite voi olla logistiikkasuunnittelun tavoitteena tai skenaarioanalyysin kohteena.

Tämän diplomityön päätulos on työkalu, jota voidaan hyödyntää metsähakkeen logistiikkasuunnittelussa keskipitkällä aikavälillä parantamaan metsähakkeen toimitusketjun kannattavuutta. Lisäksi optimointimalli valmistaa kohdeyrityksen logistiikan suunnitteluprosessia kasvavia toimitusmääriä varten. Malli vähentää päätöksentekijöiden tiedon käsittelyyn käyttämää aikaa ja vapauttaa resursseja kannattavuuden tulkitsemiseen. Logistiikkakustannusten ollessa merkittävä muuttuva kustannustekijä energiapuun toimitusketjussa, tarjoaa lineaarinen ohjelmointi arvokkaan työkalun resurssien allokoiduksi toimituskaudelle.

5.1 Jatkotutkimus ja -kehitys

Mahdollisena jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista tarkastella mallin tuottamaa hyötyä tilanteessa, jossa validoinnissa on käytettävissä ajankohtaista aineistoa retrospektiivisen tarkastelun sijaan. Yhtäältä välisiirtojen sisällyttäminen osaksi mallia kauttakuljetusongelmana tai monivaiheisena optimointina mahdollistaisi selitysvoimaisemmat tulokset laajentamalla

logistiikan käypien ratkaisujen joukkoa edellyttäen kuitenkin tarkempaa tietoa urakointi- ja terminaalikapasiteetista. Tässä työssä määritelty malli olettaa välisiirtojen tapahtuvan ennen toimituskauden alkua, sivuuttaen siten niiden vaikutukset optimoinnissa ja logistiikan suunnittelussa. Välisiirrot määrittävät tarjonnan jakautumista alueellisesti sekä eri tuotantoketjuihin ja muodostavat oman osansa logistiikan kustannuksista. Volyymien kasvamisella on ilmeinen vaikutus välisiirtojen määrässä. Välisiirtojen tavoitteena on kustannusten hallinnan lisäksi urakointikapasiteetin käytön tehostaminen ja laadunhallinta. Urakointikapasiteetin ja kustannusten mallintaminen tarkasti alueittain osana monivaiheista optimointia tukisi mallin määrittelyssä ja validoinnissa esille nostettuja tavoitteita ja kehitysehdotuksia.

Tässä työssä ja kohdeyrityksessä energiapuun kuivumista ja varastoinnin kestoa on mallinnettu yleisellä tasolla, eikä eroja alueiden tai raaka-ainejakeiden välillä huomioida. Mallinnus ei myöskään ota huomioon todellista säätilan toteumaa. Kuiva-ainetappiot muodostavat merkittävän haasteen energiapuun toimitusketjussa, minkä lisäksi varaston hallinta muuttuu haastavammaksi volyymien kasvaessa. Metsähakkeen kuivumista on mallinnettu ja ennustettu aikaisemmassa energiapuun tutkimuksessa. Vastaavan mallinnuksen integrointi osaksi tämän tutkimuksen optimointimallia parantaisi havaittua hyötyä hakkeen energiasisällön ja kuiva-ainetappioiden osalta. Mallin merkittävä laajentaminen herättää kysymyksiä suorituskyvyn ja ymmärrettävyyden suhteen, johon ratkaisuna voi tarjontapisteiden kohdalla olla klusterointi. Erityisesti toimitusten suunnittelua kevyempiin käyttötarkoituksiin mallin kompleksisuuden vähentäminen voi tuoda lisäarvoa ja parantaa ratkaisun tulkittavuutta sekä jäljitettävyyttä.

LÄHTEET

Abel, D. 1972. Linear programming and its application to the locational planning of wood-processing industries. *New Zealand Journal of Forestry Science* 3(2), s. 259-269.

Acuna, M., Anttila, P., Sikanen, L., Prinz, R. & Asikainen, A. 2012. Predicting and Controlling Moisture Content to Optimise Forest Biomass Logistics. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 33(2), s. 225-238.

Acuna, M., Sessions, J., Zamora, R., Boston, K., Brown, M. & Reza, M. 2019. Methods to Manage and Optimize Forest Biomass Supply Chains: a Review. *Current Forestry Reports*. 5, s. 123-141.

Akhtari, S. & Sowlati, T. 2013. Optimal flow of regional forest biomass to a district heating system. *International Journal of Energy Research*. 38(7), s. 954-964.

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J. & Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien puupolttoaineiden ominaisuuksia. Teknologian tutkimuskeskus VTT. *VTT Technology* 258.

Alakangas, E. & Impola, R. 2013. Puupolttoaineiden laatuohje: VTT-M-07608-13. Bioenergia ry.

Antikainen, R., Tenhunen, J., Ilomäki, M., Mickwitz, P., Punttila, P., Puustinen, M., Seppälä, J. & Kauppi, L. 2007. Bioenergian uudet haasteet Suomessa ja niiden ympäristönäkökohdat: nykytilakatsaus. Suomen Ympäristökeskuksen Raportteja, 11.

Asikainen, A., Ilvesniemi, H. & Muhonen, T. 2013. Bioenergiaa metsistä – Tutkimus- ja kehittämishankkeen keskeiset tulokset. *Metlan työraportteja* 289, 223 s.

Autio, H. 2009. Osaamistarpeet keskisuomalaisessa metsäenergian hankintaketjussa. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. 48 s.

Ba, B. H., Prins, C. & Prodhon, C. 2016. Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective. *Renewable Energy*. 87(2), s. 977-989.

Beamon, B. 1998. Supply Chain Design and Analysis: Models and Methods. *International Journal of Production Economic*. 55(3), s. 281-294.

Cambero, C. & Sowlati, T. 2014. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 36, s. 62-73.

Chopde, P. N. R., & Nichat, M. K. 2013. Landmark Based Shortest Path Detection by Using A* and Haversine Formula. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 1(2), s. 298-302.

Christopher, M. 2016. *Logistics and Supply Chain Management*. 5. painos. London, Pearson.

Dantzig, G.B. 1963. *Linear Programming and Extensions*. Princeton University Press.

De Meyer, A., Cattrysse, D., Rasinmäki, J. & Van Orshoven, J. 2014. Methods to optimise the design and management of biomass-for-bioenergy supply chains: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 31, s. 657-670.

Díaz-Yáñez, O., Mola-Yudego, B., Anttila, P., Röser, D. & Asikainen, A. 2013. Forest chips for energy in Europe: Current procurement methods and potentials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 21, s. 562-571.

Eriksson, L.O. & Björheden, R. 1989. Optimal storing, transport and processing for a forest-fuel supplier. *European Journal of Operational Research*. 43(1), s. 26-33.

- Greenberg, H.J. 1993. How to Analyze the Results of Linear Programs-Part 1: Preliminaries. *INFORMS Journal on Applied Analytics*. 23(4), s. 56-67.
- Gunnarsson, H., Rönnqvist, M. & Lundgren, J.T. Supply chain modelling of forest fuel. *European Journal of Operational Research*. 158(1), s. 103-123.
- Haataja, J. 2004. Optimointitehtävien ratkaiseminen. 3. painos. Helsinki, Picaset Oy.
- Hakkila, P. 2004. Developing technology for large-scale production of forest chips. Wood Energy Technology Programme 1999-2003, Final report. Tekes. 99 s.
- Hakkila, P. 2006a. Factors driving the development of forest energy in Finland. *Biomass and Bioenergy*. 30(4), s. 281-288.
- Hakkila, P. 2006b. Selvitys energiapuun mittauksen järjestämisestä ja kehittämisestä. Maa- ja metsätalousministeriön työryhmämuistio 8/2006. 31 s.
- Han, S. & Murphy, G.E. 2012. Solving a woody biomass truck scheduling problem for a transport company in Western Oregon, USA. *Biomass and Bioenergy*. 44, s. 47-55.
- Heikkilä, J., Laitila, J., Tantt, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. & Korhonen, K.T. 2005. Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. 56 s.
- Heiskanen, V.P., Raitila, J. & Hillebrand, K. 2014. Varastokasassa olevan energiapuun kosteuden muutoksen mallintaminen. VTT Tutkimusraportti Nro VTT-R-08637-13.
- Hillier, F.S. & Lieberman, G.J. 2001. Introduction to Operations Research. 7. painos. New York, McGraw-Hill.
- Ihalainen, T. & Niskanen, A. 2010. Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjussa. Metlan työraportteja 166.

- Iikkänen, P., Keskinen, S., Korpilahti, A., Räsänen, T. & Sirkiä, A. 2011. Energiapuuvirtojen valtakunnallinen optimointiohjelma. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2011
- Ikonen, T., Jahkonen, M., Pasanen, K. & Tahvanainen, T. 2013. Laadunhallinta ja keskeiset laatutekijät metsäenergian toimitusketjussa. Metlan työraportteja 275. 41 s.
- Jirjis, R. 1995. Storage and drying of wood fuel. *Biomass and Bioenergy*. 9(1-5), s. 181-190.
- Kanzian, C., Holzleitner, F., Stampfer, K. & Ashton, S. 2009. Regional energy wood logistics – optimizing local fuel supply. *Silva Fennica*. 43(1), s. 113-128.
- Klemetti, E. 2012. Leimikosta loppukäyttäjälle – Energiapuun toimitusketjun kehittäminen. PUULOG Bioenergian hankintalogistiikka Pohjois-Suomessa, s. 94.
- Koljonen, T., Soimakallio, S., Asikainen, A., Lanki, T., Anttila, P., Hildén, M., Honkatukia, J., Karvosenoja, N., Lehtilä, A., Lehtonen, H., Lindroos, T.J., Regina, K., Salminen, O., Savolahti, M., Siljander, R. & Tiittanen, P. 2017. Energia- ja ilmastostrategian vaikutusarviot: Yhteenvetoraportti. Valtioneuvoston selvitys ja tutkimustoiminnan julkaisusarja.
- Korpinen, O.-J., Aalto, M., KC, R. & Ranta, T. 2019. Metsähakkeen laadun parantaminen ja hankintajärjestelmän tehostaminen jatkuvan laadunmittauksen tuottaman informaation avulla. LUT University, LUT School of Energy Systems, Research Reports 100.
- Kuusinen M. & Ilvesniemi H. 2008. Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset, tutkimusraportti. Tapion ja Metlan julkaisuja. 74 s.
- Kärhä, K. 2011. Industrial supply chains and production machinery of forest chips in Finland. *Biomass and Bioenergy*. 35(8), s. 3404-3413.
- Laitila, J., Leinonen A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. 2010. Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT tiedotteita 2564.

Laitila, J. & Väättäinen, K. 2011. Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus. Metsätieteen aikakausikirja 2/2011. s. 107-126.

Luonnonvarakeskus. 2016. Kysely kiinteiden puupolttoaineiden energiakäytöstä. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 16.11.2020]._Ei saatavilla.

Luonnonvarakeskus. 2020a. Metsähakkeen haketustavat (%).

Luonnonvarakeskus. 2021a. Lämpö- ja voimalaitosten kiinteiden puupolttoaineiden käyttö.

Luonnonvarakeskus. 2021b. Metsähakkeen kokonaiskäyttö käyttökohteittain.

Lähdevaara, H., Savolainen, V., Paananen, M. & Vanhala, A. 2010. Mailta ja mannuilta, soilta ja saloilta. Selvitys Keski-Suomen biomassakuljetusten logistiikasta. Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 107.

Maa- ja metsätalousministeriö. 2019. Kansallinen metsästrategia 2025 – päivitys. Maa- ja metsätalousministeriön julkaisuja. 118 s.

Malladi, K.T. & Sowlati, T. 2018. Biomass logistics: A review of important features, optimization modeling and the new trends. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 94, s. 587-599.

McCarl, B. & Apland, J. 1986. Validation of linear programming models. Southern Journal of Agricultural Economics. 18(2), s. 155-164.

Mentzer J.T., DeWitt W., Keebler J.S., Min S., Nix N.W., Smith C.D. & Zacharia Z.G. 2001. Defining supply chain management. Journal of Business Logistics, 22(2), s. 1-25.

Neova-konserni. 2020. Vapo-konsernin tilinpäätös ja toimintakertomus 1.1.-31.12.2020. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.1.2021] Saatavilla: https://www.neova-group.com/wp-content/uploads/2021/03/7361-Vapo_TilinpäätösCC88aCC88toCC88s_2020.pdf

Neova-konserni. 2021. Liiketoiminnot. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 20.1.2022]. Saatavilla: <https://www.neova-group.com/liiketoiminnot>

Neova Oy. 2017. Suunnitelmallinen hankinta ja toimitusketjuosaaminen. Julkaisematon tutkimus.

Neova Oy. 2021a. Puupolttoaineiden tilaus- ja toimitusprosessi -kuvaus. Julkaisematon raportti.

Neova Oy. 2021b. Metsähakkeen raaka-ainehankintaprosessi. Julkaisematon raportti.

Nummelin, T., Petäjistö, L., Rummukainen, A. & Kautto, K. 2015. Metsähakkeen toimitus energiantuotantolaitokselle – toimintatavat ja arvon syntyminen. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 54/2015. Luonnonvarakeskus. 27 s.

Piirainen, A. 2005. Kuinka homma hoidetaan käytännössä. Bioenergiologiikan haasteita ja ratkaisuja koneyrityksien näkökulmasta. Koneyritysten liitto.

Poikela, A. & Venäläinen, P. 2016. Energiapuun kuljetuskaluston ja menopaluukuljetusten skenaariot. Metsätehon tulosalvosarja 2a/2016. 66 s.

Porter, M.E. 1985. Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance. New York, The Free Press.

Pöyry Forest Industry Consulting. 2006. Metsäenergian tuotannon, korjuun ja käytön kustannustehokkuus sekä tukijärjestelmien vaikuttavuus päästökaupan olosuhteissa. Loppuraportti. 47 s.

Ranta, T. & Rinne, S. 2006. The profitability of transporting uncomminuted raw materials in Finland. Biomass and Bioenergy. 30(3), s. 231-237.

Rentizelas, A., Tolis, A., & Tatsiopoulos, I. 2009. Logistics issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 13(4), s. 887-894.

Rinne, S. 2010. Energiapuun haketuksen ja murskauksen kustannukset. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö. 102 s.

Routa J., Asikainen A., Björheden R., Laitila J. & Röser D. 2012. Forest energy procurement: state of the art in Finland and Sweden. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment* (2) 6, s. 602-613.

Routa, J., Kolström, M., Ruotsalainen, J. & Siikanen, L. 2015. Validation of Prediction Models for Estimating the Moisture Content of Small Diameter Stem Wood. *Croatian Journal of Forest Engineering*. 36(2), s. 283-291.

Rusanen, Antti. 2013. Energiapuun hankinta ja terminaalijärjestelmät – esimerkkinä Hattulan Merven alue. Hämeen uusiutuvan energian tulevaisuus –hanke, s.26.

Saltelli, A. 2002. Sensitivity Analysis for Importance Assessment. *Risk Analysis*. 22(3), s. 579-590.

Seppänen, A., Harstela, P. & Rantala, J. 2008. Informaatio- ja kommunikaatioteknologia (ICT) metsänhoitoyhdistysten metsäpalveluiden hallinnassa. *Metlan työraportteja* 82. 50 s.

Sikanen, L., Röser, D., Anttila, P. & Prinz, R. 2013. Forecasting Algorithm for Natural Drying of Energy Wood in Forest Storages. *Forest Energy Observer*.

Singiresu, S.R. 2009. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. 4. painos. Chichester, Wiley.

Strandström M. 2020. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2019. *Metsätehon tulokalvosarja* 6/2020. 20 s.

Taha, H.A. 2007. Operations Research an introduction. 8. painos. New Jersey, Pearson Prentice-Hall.

Tapio Silva Oy. 2017. Energiapuun korjuu nuorista kasvatusmetsistä: Energiapuun hankinta VAPO. Julkaisematon raportti.

Tilastokeskus. 2013. Linnuntieltä oikeille teille. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 1.6.2021]. Saatavilla: https://www.stat.fi/artikkelit/2013/art_2013-12-09_003.html?s=0

Tilastokeskus. 2016. Tieliikenteen tavarankuljetukset.

Tilastokeskus. 2021. Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian kokonaiskulutus energialähteittäin.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2017. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. 121 s.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja. 212 s.

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2020. Kevään 2020 toimialojen näkymät: Uusiutuva energia. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 6.11.2020]. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2020060240179>

Valtioneuvosto. 2020. Vuoden 2021 talousarvioesitys rakentaa tietä ulos koronaviruksesta. [Verkojulkaisu]. [Viitattu 6.11.2020]. Saatavilla: <https://valtioneuvosto.fi/-/10616/vuoden-2021-talousarvioesitys-rakentaa-tieta-ulos-koronaviruksesta>

Vanderbei, R. 2001. Linear Programming: Foundations and Extensions. 2. painos. Springer / 2002. Journal of the Operational Research Society. 49(1). s

Venäläinen, P., Alanne, H., Ovaskainen, H., Poikela, A. & Strandström, M. 2018. Kausivaihtelun kustannukset ja vähentämiskeinot puun toimitusketjussa. Metsätehon tulosalvosarja 8/2017. 76 s.

Venäläinen, P. & Poikela, A. 2016. Energiapuun kuljetuskaluston ja meno-paluukuljetusten skenaariot. Metsätehon tulosalvosarja 2a/2016. Metsäteho Oy. 66 s.

Väätäinen, K. 2018. Developing forest chips supply chains by redesigning supply operations and logistics. Dissertations Forestales.

Webster, J. & Watson, R.T. 2002. Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. *MIS Quarterly*, 26(2), s. xxiii-xxiii.

Weintraub, A., D'Amours, S. & Rönnqvist, M. 2008. Using Operational Research for Supply Chain Planning in the Forest Products Industry. *INFOR: Information Systems and Operational Research*. 46(4), s. 265-281.

Williams, H.P. 2013. *Model Building in Mathematical Programming*. 5. painos. Chichester, Wiley.

Windisch, J., Väätäinen, K., Anttila, P., Nivala, M., Laitila, J., Asikainen, A. & Sikanen, L. 2015. Discrete-event simulation of an information-based raw material allocation process for increasing the efficiency of an energy wood supply chain. *Applied Energy*. 149, s. 315-325.

Winston, W.L. & Goldberg, J.B. 2004. *Operations research: Applications and algorithms*. 4. painos. Belmont, Duxbury Press.

Wolfsmayr, U.J. & Rauch, P. 2014. The primary forest fuel supply chain: A literature review. *Biomass and Bioenergy*. 60, s. 203-221.

Liite 1. Tutkimuksen aikana suoritettavat vapaamuotoiset haastattelut kohdeyrityksessä

Mäkelä, M. 2021. Kehitys- ja analytiikkapäällikkö. Neova Oy. Työn ohjaaja.

Kylä-Setälä, M. 2021. Toimitusketjupäällikkö. Neova Oy.

Hyvösaho, P. 2021. Puupolttoainepäällikkö/liiketoiminnanjohtaja. Neova Oy.

Immonen, K. 2021. Puupolttoainepäällikkö. Neova Oy.

Laitinen, J-J. 2021. Vanhempi asiakkuusjohtaja. Neova Oy.