



OULUN YLIOPISTO
UNIVERSITY of OULU

TALOUSTIETEIDEN TIEDEKUNTA

Tuomas Hakonen

**BIOENERGIATERMINAALIN HANKINTAKETJUN KANNATTAVUUS ERI
KULJETUSÄISYYKSILLÄ JA -VOLYYMEILLA**

Pro gradu -tutkielma

Logistiikka

Tammikuu 2013

Yksikkö Markkinoinnin yksikkö			
Tekijä Hakonen Tuomas		Työn valvoja Juntunen Jouni, tutkijatohtori	
Työn nimi Bioenergiaterminaalin hankintaketjujen kannattavuus eri kuljetusetäisyyksillä ja -volyymeilla			
Oppiaine Logistiikka	Työn laji Pro gradu -tutkielma	Aika Tammikuu 2013	Sivumäärä 75 + liite 1 kpl
Tiivistelmä			
<p>Työssä selvitettiin kuljetusmatkan ja -volyymien vaikutusta energiapuun hankintaketjujen kannattavuuteen. Näitä tekijöitä tarkasteltiin yhtäaikaaisesti. Vertailtavana oli neljä karsitun rangan hankintaketjua. Kolme hankintaketjuista kulki bioenergiaterminaalin kautta ja näiden kustannuksia verrattiin yleisimmin käytettyyn tienvarsihaketukseen ja suoraan autokuljetukseen perustuvaan ketjuun. Ketjujen kustannuksia tarkasteltiin bioenergiaterminaalin omistajan näkökulmasta. Muut ketjun osat olivat alihankkijoiden hallussa. Tästä seurasi, että volyymin vaikutus näkyi ainoastaan terminaalitoiminnoissa.</p> <p>Tutkimuksessa hyödynnettiin simulointimenetelmää. Kaikille neljälle vertailtavalle hankintaketjulle tehtiin oma simulointimallinsa. Simulointimalleja ajettiin erilaisilla kuljetusmatkan ja -volyymien lähtöarvoilla ja näin saatuja tuloksia verrattiin toisiinsa. Kaikissa simuloinneissa tavoiteltiin 30 päivän kestoaikaa ja tasaista energiapuuvirtaa. Simulointimalleissa käytetyt kustannus- ja kapasiteettitekijät saatiin alan toimijoilta ja aiemmista tutkimuksista. Kustannus- ja kapasiteettitekijöiden valinnassa pyrittiin siihen, että ne edustaisivat mahdollisimman hyvin nykyisin kentällä vallitsevaa tilannetta. Tutkimuksessa vakioitiin hallintokustannukset ja voittomarginaali tietylle tasolle kokonaiskustannuksista. Näin päästiin paremmin tarkastelemaan hankintaketjujen kilpailukyky potentiaalia.</p> <p>Millään tutkimuksessa tarkastellulla kuljetusetäisyydellä ja -volyymillä terminaalin kautta kulkeva autokuljetusketju ei pärjännyt kustannustehokkuudessa tienvarsihaketukseen ja suoraan autokuljetukseen pohjautuvalle ketjulle. Rautatiekuljetukset terminaalista olivat suoraa autokuljetusta kannattavampia lyhimmillään jo 70 km etäisyydellä ja muokatuissa malleissa, joissa kustannustekijöitä oli tavanomaisesta tasosta laskettu, jopa 55 km etäisyydellä. Tähän vaadittiin 15000 m³/kk volyymin ja suoraa kuljetusta käyttökohteelle. Tulokset antavat viitteitä siitä, että rautatiekuljetusten voittomarginaalit ja/tai hallintokustannusosuudet ovat osin suurempia kuin autokuljetuksissa. Toisaalta pidemmällä alkukuljetusmatkalla ja rautatiekuljetuksella, jossa loppukuljetus hoidetaan autolla, tulokset asettuvat lähellä aiempien tutkimusten 150 km kannattavuusrajaa. Rautateiden tavarakuljetusten kilpailun vapautuminen ajanee ennen pitkää myös käytännön kilpailukykyä lähemmäs tämän tutkimuksen tuloksia.</p> <p>Tulokset soveltuvat yleisen tarkastelun pohjaksi, kun arvioidaan tarkastelun kohteena olleiden hankintaketjujen kannattavuutta eri kuljetusetäisyyksillä ja -volyymeilla. Koska tarkastelu on tehty terminaalin omistajan näkökulmasta, on näiden tulosten pohjalta mahdollista arvioida terminaalin perustamisen järkevyyttä. Kustannukset vaihtelevat kuitenkin eri tilanteissa ja tästä syystä on tärkeää perehtyä tämän tutkimuksen aineistona käytettyihin kustannus- ja kapasiteettitekijöihin, ennen kuin soveltaa tutkimustuloksia uuteen tilanteeseen. Jokainen yrittäjä tekee aina omat laskelmansa ja vastaa niistä.</p>			
Asiasanat energiapuu, ranka, rautatiekuljetus, simulointi			
Muita tietoja -			

ALKUSANAT

Monien yllättävien ja opettavaisten vaiheiden jälkeen tyhjän paperin kammo on jälleen voitettu ja lopputuote on tukevasti kansissa. Yksi urakka on ohi ja on hyvä tilaisuus pohdiskella tulevaa uusista lähtökohdista.

Tämän gradun tekemisessä ovat auttaneet niin monet henkilöt, etten kaikkia lähde enkä edes pysty luettelemaan. Joukossa on paljon myös yritysten edustajia, jotka ovat halunneet pysyä nimettöminä. Suuret kiitokset kaikille teille eri yritysten edustajille, jotka olette suhtautuneet myönteisesti tutkimukseni aineiston keruuseen. Ymmärrettävästi kustannustietojen luovuttaminen ei ole yrityksille mikään helppo asia. Totuudenmukaisen, kentältä tulevan, kustannustiedon saaminen on kuitenkin monessa tapauksessa välttämätöntä, mikäli kannattavuuteen liittyvää tutkimusta halutaan tehdä. Tämän tutkimuksen tekeminen ei olisi onnistunut ilman näitä tietoja.

Minulla on ollut hieno mahdollisuus hyödyntää varsinaisessa työssäni tuotettua tutkimusaineistoa tässä gradussa. Tästä haluan kiittää Seinäjoen ammattikorkeakoulua ja Kestävä metsäenergia –hanketta sekä hankkeemme rahoittajaa Manner-Suomen maaseutuohjelmaa. Erityiskiitokset professori Jari Jugalle (Oulun yliopisto) sekä dosentti Risto Lauhaselle (Seinäjoen ammattikorkeakoulu) ja vastuututkija Jussi Laurilalle (Seinäjoen ammattikorkeakoulu) käsikirjoituksen kommentoinnista ja parannusehdotuksista.

Lopuksi kiitokset ohjaajalleni tutkijatohtori Jouni Juntuselle (Oulun yliopisto). Tapaamisissamme sain simulointiohjelman käyttöön tärkeitä vinkkejä ja uskonvahvistusta siihen, että asiat etenevät oikeaan suuntaan.

Ähtärissä 17.1.2013

Tuomas Hakonen

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Alkusanat

Sisällysluettelo

Kuviot ja taulukot

1 JOHDANTO	8
1.1 Tausta	8
1.2 Tutkimuksen tavoite	9
1.3 Tutkimusmenetelmä	11
1.4 Tutkimuksen eteneminen	11
2 TEOREETTINEN VIITEKEHYS	13
2.1 Hankintaketjut ja kustannukset	13
2.1.1 Hankintaketjujen peruskäsitteet	13
2.1.2 Logistiikan vaikutus tuottoihin ja kustannuksiin	15
2.1.3 ABC-laskenta ja kustannustekijät	16
2.2 Bioenergia	19
2.2.1 Bioenergian määritelmä ja käyttömäärät	19
2.2.2 Metsästä saatava bioenergia	19
2.3 Rangan hankintaketjut	21
2.3.1 Hankintaketjujen kuvaus ja käyttömäärät	21
2.3.2 Rangan hankintaketjujen erityispiirteet	24
2.3.3 Rangan hankintaketjujen kustannus selvitykset	25
2.4 Bioenergiaterminaalit	26
2.4.1 Bioenergiaterminaalien tulevaisuus ja toiminnan kannattavuus	26
2.4.2 Bioenergiaterminaalien edut ja haitat	28
2.5 Rautateiden merkitys energiapuun kuljetuksissa	29
3 AINEISTO JA MENETELMÄT	31
3.1 Käytetty aineisto	31
3.1.1 Hankintaketjujen toiminta	32
3.1.2 Hankintaketjujen kustannukset	36

3.2 Simulointi	40
3.2.1 Simulointimallien luokittelu	41
3.2.2 Simuloinnin vahvuudet ja heikkoudet	43
3.2.3 Mallien verifiointi ja validointi.....	44
4 TULOKSET JA TARKASTELU	45
4.1 Perussimuloinnit.....	45
4.2 Pidempään alkukuljetusmatkaan pohjautuvat simuloinnit.....	49
4.3 Rauta- ja maantiekuljetuksia hyödyntävien terminaalien simuloinnit	52
4.4 Muokattuihin terminaalin kustannustekijöihin pohjautuvat simuloinnit.....	55
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	59
5.1 Tutkimustulokset ja niiden merkitys aiempaan tutkimukseen verrattuna.....	59
5.2 Tutkimuksen rajoitteet.....	62
5.3 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys	65
5.4 Luotettavuus	66
5.5 Jatkotutkimustarpeet.....	68
LÄHDELUETTELO.....	70
LIITTEET	
Liite 1 Kuva simulointimallista	76

KUVIOT

Kuvio 1. Rangan hankintaketjut haketusvaiheen perusteella luokiteltuna.....	22
Kuvio 2. Vertailtavat hankintaketjut.....	31
Kuvio 3. Matkan vaikutus kuljetusaikaan tyhjänä- ja kuormattuna-ajossa.....	33
Kuvio 4. Hakkurin sekä ranka- ja hakeauton ajonaikainen polttoaineen kulutus.....	39
Kuvio 5. Osakuva yhdestä tutkimuksesta käytetystä simulointimallista.....	42
Kuvio 6. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 5000 m ³ /kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin.....	46
Kuvio 7. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 15000 m ³ /kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin.....	47
Kuvio 8. Kuljetusvolyymin vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin yhdensuuntaisilla kuljetusmatkoilla 10 km ja 290 km alkukuljetusmatkan terminaaliin ollessa 10 km.....	49
Kuvio 9. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 5000 m ³ /kk ja 50 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin.....	50
Kuvio 10. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 15000 m ³ /kk ja 50 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin.....	51
Kuvio 11. Kuljetusvolyymin vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin yhdensuuntaisilla kuljetusmatkoilla 10 km ja 290 km alkukuljetusmatkan terminaaliin ollessa 50 km.....	51
Kuvio 12. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjuyhdistelmien kustannuksiin volyymilla 5000 m ³ /kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin.....	53
Kuvio 13. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjuyhdistelmien kustannuksiin volyymilla 15000 m ³ /kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin.....	54
Kuvio 14. Kuljetusvolyymin vaikutus hankintaketjuyhdistelmien kustannuksiin kuljetusmatkoilla 10 km ja 290 km alkukuljetusmatkan terminaaliin ollessa 10 km.....	54
Kuvio 15. Kuljetusmatkan vaikutus kustannuksiin hankintaketjuissa, joissa terminaalin kustannustekijöitä (terminaalin pinta-ala ha, terminaalin perustamiskustannus €/m ³ , työajat h) on muokattu, volyymilla 5000 m ³ /kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin.....	56

Kuvio 16. Kuljetusmatkan vaikutus kustannuksiin hankintaketjuissa, joissa terminaalin kustannustekijöitä (terminaalin pinta-ala ha, terminaalin perustamiskustannus €/m³, työajat h) on muokattu, volyymilla 15000 m³/kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin57

Kuvio 17. Kuljetusvolyymin vaikutus kustannuksiin hankintaketjuissa, joissa terminaalin kustannustekijöitä (terminaalin pinta-ala ha, terminaalin perustamiskustannus €/m³, työajat h) on muokattu, kuljetusmatkoilla 10 km ja 290 km alkukuljetusmatkan terminaaliin ollessa 10 km57

TAULUKOT

Taulukko 1. Maantie- ja rautatiekuljetusten kustannusten ryhmittely18

Taulukko 2. Kustannusten laskennassa käytetyt lukuarvot37

1 JOHDANTO

1.1 Tausta

Bioenergian käyttömääriä pyritään nostamaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi (Ympäristöministeriö 2008: 27 – 32). Suurin osa käytön lisäyksestä on tarkoitus kattaa metsästä peräisin olevalla energialla (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010: 7) eli kannoilla, pienpuulla (pienläpimittainen runkopuu) ja hakkuutähteillä (oksat ja latvusmassa). Tämä tarkoittaa, että metsäenergian raaka-ainetta ei saada jatkossa hankittua yhtä läheltä käyttökohteita ja hankinta-alueita on näin ollen laajennettava. Tämä kehitys myös väistämättä pidentää kuljetusmatkoja. Pidentyvät kuljetusmatkat ja kasvavat volyymit mahdollistavat ja jopa edellyttävät keskitettyjen tuotantoratkaisujen hyödyntämistä, jotta tarvittavat energiapuumäärät saadaan tehokkaasti kuljetettua. Metsäenergian tuotantoketjussa oleellista on, missä vaiheessa ketjua raaka-aineen haketus tehdään ja missä raaka-aine varastoidaan. Keskitetyn ratkaisun haketukseen ja varastointiin tarjoaa bioenergiaterminaali.

Bioenergiaterminaali -sanaa käytetään varsin laveasti aina pienistä tienvarressa sijaitsevista hiekkapohjaisista varastoista suuriin asvaltoituihin varasto- ja lastausalueisiin, joissa energiapuuta voidaan jalostaa hakettamalla ja kuivaamalla sekä hyödyntää autokuljetusten ohella mahdollisesti myös rautatiekuljetuksia (Rinne ym. 2010: 125 – 127). Yleensä kuitenkin ajatellaan, että bioenergiaterminaalitoimintaan kuuluu varastoinnin ohella myös raaka-aineen jalostus. Bioenergiaterminaalitoiminnan kannattavuuden kannalta merkittäviä tekijöitä ovat kuljetusetäisyydet terminaaliin ja terminaalista sekä terminaalin läpi kulkevan bioenergian volyymit (Iikkanen & Siren 2005: 58, Laitila & Väätäinen 2011: 120 – 121, Tahvanainen & Anttila 2011: 3368).

Nykyään yleisimmin käytetty metsäenergian hankintaketju perustuu metsäteiden varressa varastointiin ja haketukseen (Strandström 2012: 12). Bioenergiaterminaalitoiminnan kannattavuutta arvioitaessa vertailua tehdään näin ollen ensisijaisesti tämän ketjun kustannuksiin.

Pidentyvät kuljetusmatkat mahdollistavat tulevaisuudessa todennäköisesti myös aiempaa laajamittaisemman rautateiden käytön bioenergian kuljetuksiin. Bioenergiaterminalitoimintaan voidaan sujuvasti yhdistää junien kuormaus. Näin voidaan parantaa sekä rautatiekuljetusten että koko keskitetyn ratkaisun kannattavuutta. Lyhyillä etäisyyksillä ja pienillä volyyymeilla rautatiet eivät pysty kilpailemaan maantiekuljetuksia vastaan (Iikkanen & Siren 2005: 58, Tahvanainen & Anttila 2011: 3368). Nykyään selvästi suurin osa metsäbioenergian kuljetuksista tehdäänkin vielä autoilla (Torvelainen 2011: 207).

Rautatiekuljetukset ovat pitkään olleet yhden toimijan hallussa. Tämä on saattanut johtaa tehottomuuteen ja paisuneisiin voittomarginaaleihin. Bioenergian hankintaketjujen keskinäistä kilpailukyky potentiaalia päästään vertaamaan, kun vakioidaan voittomarginaalit ja hallintokustannukset. Muiden kustannusten osalta hyödynnetään mahdollisimman totuudenmukaisia arvoja.

1.2 Tutkimuksen tavoite

Tutkimuksessa verrataan neljän erilaisen energiapuun hankintaketjun kannattavuutta toisiinsa. Vertailtavat ketjut ovat: 1. Energiapuun tienvarsihaketus ja kuljetus hakeautoilla suoraan käyttökohteelle; 2. Energiapuun kuljetus ranka-autoilla tienvarresta bioenergiaterminaliin, jossa haketus ja jatkokuljetus hakeautoilla käyttökohteelle; 3. Energiapuun kuljetus ranka-autoilla tienvarresta bioenergiaterminaliin, jossa haketus ja jatkokuljetus junalla käyttökohteelle; 4. Energiapuun kuljetus ranka-autoilla tienvarresta bioenergiaterminaliin, jossa haketus ja jatkokuljetus junalla purkuterminaliin, josta loppukuljetus hakeautoilla. Erityisesti keskitytään tarkastelemaan kuljetusetäisyyden ja kuljetusvolyymien vaikutusta hankintaketjujen kannattavuuteen. Vastausta haetaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

Päätutkimuskysymys:

Mikä on bioenergiaterminaalien kautta kulkevien metsäenergian hankintaketjujen kannattavuus verrattuna tienvarsihaketukseen ja suoraan autokuljetukseen perustuvaan hankintaketjuun?

Alatutkimuskysymykset:

Millä energiavuolyymeilla ja kuljetusetäisyyksillä bioenergiaterminaalitoiminta voisi olla kannattavaa?

Mikä on auto- ja junakuljetusten välinen kannattavuus eri kuljetusetäisyyksillä?

Tutkimuksella tavoitellaan aiempaa laajempaa käsitystä bioenergian hankintaketjujen kannattavuudesta. Kuljetusetäisyyden vaikutusta kannattavuuteen on selvitetty aiemminkin, mutta samanaikaisesti ei ole tarkasteltu kuljetusvolyymien vaikutusta. Erityisesti bioenergiaterminaaliliiketoiminnassa kuljetusvolyymit vaikuttavat merkittävästi kannattavuuteen. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan samanaikaisesti sekä etäisyyden että volyymin vaikutusta bioenergiaterminaalitoiminnan kannattavuuteen. Vertailukohtana on yleisesti käytetty tienvarsihaketukseen ja suoraan autokuljetukseen perustuva hankintaketju.

Tutkimuksella tavoitellaan myös uutta tietoa maantie- ja rautatiekuljetusten välisestä kannattavuudesta eri kuljetusetäisyyksillä. Rautateiden tavarankuljetusten kilpailun vapautuminen vuonna 2007 ja uusien toimijoiden mahdollinen tulo alalle saattavat parantaa rautateiden kilpailukykyä verrattuna maantiekuljetuksiin. Vakioituun hallintokustannusosuuteen ja voittomarginaaliin perustuva tarkastelu antaa mahdollisuuden vertailla millä etäisyyksillä maantie- ja rautatiekuljetukset tosiasiallisesti voisivat olla kannattavia. Kilpailu ajaa ennen pitkää tilannetta tähän suuntaan.

1.3 Tutkimusmenetelmä

Tutkimusmenetelmänä käytetään diskreettiä tapahtumasimulointia. Tutkimuksessa käytettävien simulointimallien numeeriset tiedot saatiin sekä alan toimijoilta että aiemmasta tutkimuksesta. Jokaiselle tutkimuksen kohteena olevalle hankintaketjulle on oma simulointimallinsa. Simulointimalli jäljittelee todellista hankintaketjua aika-, kustannus- ja kapasiteettitietoineen. Simuloimalla voidaan tehokkaasti tarkastella monimutkaisten, muuttuvien ja toisiinsa kytkeytyneiden prosessien toimintaa. Simulointi myös mahdollistaa monia muita menetelmiä paremmin ajan ja ajasta johtuvien kustannustekijöiden huomioonottamisen (Harrington & Tumay 2000: 2). Tutkimuksessa käytettiin Vensim PLE -ohjelmaa.

1.4 Tutkimuksen eteneminen

Teoreettisessa viitekehyksessä käydään aluksi läpi otsikon 2.1 Hankintaketjut ja kustannukset alla hankintaketjujen peruskäsitteitä, jonka jälkeen lyhyesti perehdytään logistiikan vaikutuksiin liiketoiminnan kustannuksiin ja tuottoihin. Tämän jälkeen tarkastellaan logistiikan kustannusten kohdistamista ja jaottelua ABC-laskennalla. Otsikko 2.2 Bioenergia on varattu bioenergian peruskäsitteille, käyttömäärille ja -potentiaaleille. Painotus on metsäenergiassa. 2.3 Rangan hankintaketjut esittelee nykyisin käytössä olevat rangan hankintaketjut ja niiden toiminnan sekä erityispiirteet yleiseen hankintaketjujen toimintaan verrattuna. Seuraavaksi käydään läpi bioenergiaterminaalien kannattavuutta, toimintaa ja mahdollisuuksia (2.4 Bioenergiaterminaalit) sekä rautateiden nykytilannetta ja mahdollisuuksia energiapuun kuljetuksissa (2.5 Rautateiden merkitys energiapuun kuljetuksissa).

Aineistossa ja menetelmissä kuvataan aluksi tutkimuksessa käytetty aineisto, aineiston hankinta ja tutkimuskohteena olevien hankintaketjujen toiminta (3.1 Käytetty aineisto). Simulointimenetelmän kuvaus, sen vahvuudet ja heikkoudet sekä mallien verifiointi ja validointi on esitetty otsikon 3.2 Simulointi alla.

Tulokset on jaettu neljän otsikon alle. Ensin esitetään tulokset tavanomaisilla lukuarvoilla tehdyistä simuloinneista (4.1 Perussimuloinnit). Näiden on tarkoitus toimia lähtökohtana ja vertailupohjana muille simuloinneille. Seuraavana ovat vuorossa 4.2 Pidempään alkukuljetusmatkaan pohjautuvat simuloinnit, joissa on kokeiltu pidennetyn alkukuljetusmatkan vaikutusta terminaalihankintaketjujen kustannuskilpailukykyyn. Vertailu perussimulointeihin mahdollistaa alkukuljetusmatkan kustannusvaikutuksen arvioinnin. Otsikon 4.3 Rauta- ja maantiekuljetuksia hyödyntävien terminaalien simuloinnit alla on kokeiltu miten terminaalitoiminnan kustannukset muuttuvat, kun terminaalin kautta kulkee sekä maantie- että rautatiekuljetusketjuja eri prosenttiosuuksilla. Tulosten lopuksi kokeillaan vielä kuinka terminaalin pinta-alan, perustamiskustannusten ja työaikojen muokkaaminen vaikuttaa kustannuksiin ja ketjujen keskinäiseen kilpailukykyyn (4.4 Muokattuihin terminaalin kustannustekijöihin pohjautuvat simuloinnit).

Johtopäätösluvussa on viisi alaotsikkoa: 5.1 Tutkimustulokset ja niiden merkitys aiempaan tutkimukseen verrattuna, 5.2 Tutkimuksen rajoitteet, 5.3 Tulosten yleistettävyyden ja hyödynnettävyyden, 5.4 Luotettavuus ja 5.5 Jatkotutkimustarpeet.

2. TEOREETTINEN VIIITEKEHYS

2.1 Hankintaketjut ja kustannukset

2.1.1 Hankintaketjujen peruskäsitteet

Hankintaketjun tavoitteena on tarjota asiakkaalle oikea määrä, oikeita tuotteita, oikeaan aikaan ja oikeaan paikkaan toimitettuna. Tämä pitäisi vielä pystyä tekemään mahdollisimman kustannustehokkaasti. Tähän pyritään hankintaketjun hallinnalla, joka pohjautuu aina kolmen erilaisen virran hallintaan. Nämä ovat materiaali-, informaatio- ja rahavirta. (Pundoor & Herrmann 2006: 125.) Tässä tutkimuksessa tullaan keskittymään rahavirtaan ja erityisesti rahavirran kustannuspuoleen. Rahavirtaa ei voida tarkastella täysin itsenäisesti, kahta muuta logistiikan perusvirtaa huomioimatta, koska virrat ovat toisiinsa kytköksissä. Erityisesti materiaalivirta on niin suoraan rahavirtaan kytköksissä, että sen on oltava koko ajan tarkastelussa mukana.

Jotta hankintaketjun tavoitteena oleva asiakkaan palveleminen onnistuisi parhaalla mahdollisella tavalla, on hankintaketjulle määritettävä palvelustandardit. Tämä vaatii sekä asiakkaan toiveiden että omien toimintamahdollisuuksien syvällistä ymmärtämistä. Seuraavat tekijät ovat avainasemassa hankintaketjun palvelustandardeja määritettäessä. (Christopher 2005: 74 – 76.):

- tilauksen toimitusaika (tilauksesta tuotteen toimittamiseen kuluva aika)
- tuotteen saatavuus (määrää tai prosenttiosuus, joka tilauksesta pystytään täyttämään)
- tilausmäärien rajoitteet (kerralla toimitettavat tuotteiden maksimimäärät)
- tilauksen suorittamistapa (tilausprosessin sujuvuus)
- toimitusten tiheys (tilausten toimitusväli)
- toimitusten luotettavuus (se osuus tilauksista, jotka pystytään toimittamaan ajallaan)
- tilausdokumenttien virheettömyys (esimerkiksi laskujen ja tilausvahvistusten paikkansapitävyys)
- valitusten käsittely (käsittelyn nopeus ja mahdollisten korvausten taso)

- toimitusten täydellisyys (se osuus tilauksista, jotka pystytään toimittamaan ilman puutteita)
- tuotetuki (korjauspalvelut ja opastus tuotteiden käytössä)
- tilausten seuranta (palvelu, jolla voidaan seurata toimituksen etenemistä)

Palvelutaso liittyy tiiviisti palvelustandardeihin. Palvelutaso kuvaa sitä todennäköisyyttä, jolla toimitusajan kuluessa varastotaso ei mene nolnaan (Simchi-Levi ym. 2008: 42). Palvelutasona pidetään joissain yhteyksissä myös sitä osuutta tilausmääristä, jotka pystytään toimittamaan ajallaan.

Varmuusvarastolla pyritään varmistamaan, että varasto ei tyhjene vaikka tuotteen menekki nousisi ennakoitua korkeammaksi. Mitä suurempaa on tilauksissa ilmenevä hajonta sen suurempia varmuusvarastoja joudutaan pitämään (Simchi-Levi ym. 2008: 42). Myös tavoiteltu palvelutaso ja toimitusajat vaikuttavat varmuusvaraston kokoon.

Hankintaketjujen toiminta perustuu usein tilauspisteeseen (reorder point) ja taloudelliseen tilausmäärään (economic order point). Tilauspisteellä tarkoitetaan tiettyä varastotasoa, jonka alittuessa uusi tilaus lähtee. Tilauspisteeseen vaikuttaa tilauksen toimitusaika, ennakoitu menekki ja varmuusvaraston taso. Taloudellinen tilausmäärä on laskennallinen luku, joka pohjautuu varaston ylläpitokuluihin ja yksittäisen tilauksen kustannuksiin. Toisessa yleisesti käytetyssä tavassa tilausten toimitusväli on vakio ja tilausmäärät vaihtelevat riippuen varastotasosta. (Christopher 2005: 123.) Joissakin hankintaketjuissa käytetään myös tapaa, jossa tilausmäärä on aina vakio, mutta toimitusten tiheys vaihtelee (Gudehus & Kotzab 2009: 313).

Toimitusajalla tarkoitetaan yleensä aikaa, joka kuluu tilauksen vastaanottamisesta tilauksen toimittamiseen (order-to-delivery). Tuotteen toimittajan kannalta tuotteen toimitusaikaa tärkeämpää on kuinka nopeasti tuote ja tuotteeseen käytetyt tuotantopanokset saadaan muutettua rahaksi (cash-to-cash). Tuotteeseen sitoutuu pääomaa alkaen raaka-aineiden hankintakustannuksista ja edelleen tuotanto-, työvoima-, varastointi- ja kuljetuskustannuksista. Mitä pidempään tämä pääoma on sitoutuneena tuotteeseen, sitä korkeammaksi pääomakustannukset muodostuvat. (Christopher 2005: 150 – 153.) Tavoitteena on, että kustannukset muodostuisivat

mahdollisimman lähellä asiakasta. Tämä ei kuitenkaan ole aina mahdollista pitkissä ja monimutkaisissa hankintaketjuissa.

Bullwhip -efekti nostaa hankintaketjun kustannuksia. Bullwhip -efektillä tarkoitetaan lyhyesti kuvattuna tilannetta, jossa tilausmäärien vaihtelu ja näin ollen myös varmuusvarastojen tasot nousevat, kun tullaan loppukäyttäjistä kohti ketjun alkupäätä. Tämä aiheutuu seuraavista tekijöistä: puutteelliset kysynnän ennakointimenetelmät, pitkät toimitusajat, tilausten niputtaminen, hintojen vaihtelu ja liioitellut tilaukset (esim. ennakoitaessa tuotteen toimituskatkoksia). (Simchi-Levi ym. 2008: 154 – 156.)

2.1.2 Logistiikan vaikutus tuottoihin ja kustannuksiin

Solakiven ym. (2012: 19) mukaan logistiikkakustannukset olivat vuonna 2011 keskimäärin 12,1 % suomalaisten yritysten liikevaihdosta. Logistiikkakustannusten osuus kokonaiskustannuksista vaihtelee kuitenkin selvästi toimialoittain. Logistiikkakustannuksista usein merkittävä osa on kiinteitä. Matalan jalostusasteen tuotteilla logistiikkakustannukset edustavat usein suurempaa osaa kokonaiskustannuksista kuin korkean jalostusasteen tuotteilla. Toisaalta erityisjärjestelyjä vaativat kuljetukset (esim. vaaralliset aineet, tietyt elintarvikkeet) nostavat korkean jalostusasteen tuotteiden logistiikkakustannusten osuutta kokonaiskustannuksista (Solakivi ym. 2010: 134).

Christopher (2005: 86 - 88) on tarkastellut logistiikan vaikutusta yrityksen taseeseen. Kasaan ja saataviin ei logistiikalla nähdä useinkaan olevan vaikutusta. Kuitenkin esimerkiksi lyhyet toimitusajat ja täydelliset toimitukset nopeuttavat laskutusta ja kassavirtaa.

Käyttöpääoman tarvetta voidaan hankintaketjuissa vähentää merkittävästi. Tähän päästään toiminnan sujuvuutta parantamalla ja arvoa tuottamattoman ajan vähentämisellä. (Christopher 2005: 91.)

Varastoihin sitoutuu usein yli 50 % yrityksen vaihto-omaisuudesta. Lisäksi varastoinnista aiheutuu pääomakustannuksia, varastointi- ja käsittelykustannuksia,

hävikin ja tuotteen laadun heikkenemisen aiheuttamia kustannuksia sekä vakuutus- ja hallinnointikustannuksia. Yrityksen huolellisella varastojen hallinnalla voidaan merkittävästi pienentää sitoutunutta vaihto-omaisuutta. (Christopher 2005: 86, 102.)

Tuotantotiloista ja -koneista aiheutuu pääomakuluja. Näitä voidaan vähentää esimerkiksi toiminnan ulkoistuksilla. Tuotettua yksikköä kohti kiinteät kustannukset laskevat, kun käyttöasteet saadaan nostettua korkealle. (Christopher 2005: 87.)

Velan osuutta saadaan pienennettyä tuotannon ja toimitusten huolellisella suunnittelulla, mikä pienentää varastojen tarvetta. Velan ja oman pääoman suhdetta saadaan muutettua ulkoistuksilla, kun siirrytään pääomakustannusten maksamisesta tavarantoimittajan laskujen maksamiseen. Tämä vaikuttaa toiminnan rahoittamisen mahdollisuuksiin ja pääoman tuotto prosenttiin. (Christopher 2005: 87 – 88.)

2.1.3 ABC-laskenta ja kustannustekijät

Erilaisia kuljetusten ja hankintaketjujen hinnoittelumalleja on kehitetty jo 1960-luvulta lähtien. Näiden perinteisten mallien ongelmana on ollut, etteivät ne kiinnitä riittävästi huomiota todellisiin kustannusten aiheuttajiin, resursseja kuluttaviin toimintoihin, toteutuneisiin suoritteisiin ja siihen, kuinka kustannukset muuttuvat eri tekijöistä johtuen. (Oksanen 2003: 19.)

Edellä mainittuja puutteita on pyritty korjaamaan toimintolaskennalla (ABC-laskenta, Activity Based Costing), joka on nykyään käytetyistä kustannusten laskentamalleista kaikkein tunnetuin (Oksanen 2003: 19). Se on käyttökelpoinen väline toimintokustannusten laskemiseen ja tuote- ja asiakaskohtaisten hinnoittelulaskelmien tekemiseen (Fogelholm 1997: 44). Toimintolaskennassa yrityksen organisaatio jaetaan toimintoihin (Oksanen 2003: 27). Todelliset suoritteet ja palvelut kohdistetaan sitten näille toiminnoille käyttömäärien mukaan. Tämä on välttämätön edellytys hankintaketjujen kustannustehokkuuden parantamisen ja toimitusprosessien kehittämisen kannalta. Näin on mahdollista laskuttaa myös asiakasta ”aiheuttamisperiaatteen” mukaisesti. On toki korostettava, että hinnoittelu ei perustu pelkästään todellisiin kustannuksiin, vaan myös esimerkiksi kilpailutilanteeseen ja osapuolten neuvotteluvoimaan (Oksanen 2003: 23).

Kuljetusten kysyntä on tuotteiden ja raaka-aineiden kysynnästä nousevaa kysyntää. Lyhyellä tähtäyksellä kuljetuksia ei voida korvata muilla tuotantopanoksilla. Pitkällä aikavälillä kuljetustarvetta voidaan vähentää esim. varastojen ja tuotantolaitosten sijoittelulla (Oksanen 2003: 28, Searcy ym. 2007: 650). Hankintaketjujen peräkkäisten vaiheiden välillä on aina paikka- ja aikaeroja, mikä aiheuttaa kuljetustarpeen. Lisäksi kuljetukset asettavat vaatimuksia edeltäville ja seuraaville vaiheille. Näitä vaatimuksia ovat esimerkiksi erilaiset kuljetustekniset ja toimintojen ajoitukseen liittyvät tekijät. Erityispiirteensä kuljetuksille aiheuttavat myös esimerkiksi liikenne- ja sääolosuhteet sekä suhdanteiden vaikutus kuljetusmääriin (Oksanen 2003: 28). Kuljetusten kustannustehokkuus edellyttää korkeaa kuljetuskapasiteetin käyttöastetta (Allen ym. 1998: 471). Oksanen (2003: 30) mukaan tämä voidaan saavuttaa oikein mitoitetulla kalustovalinnalla, hyödyntämällä menopaluu kuljetuksia ja optimoimalla kuljetusreitit. Hankintaketjuja tulisi aina tarkastella kokonaisuutena, että ei sorruttaisi ketjujen osaoptimointiin (Allen ym. 1998: 471).

Oksanen (2003) on esittänyt tutkimuksessaan kuljetuskustannusten ryhmittelyt eri kuljetustavoille (taulukko 1). Samaan logiikkaan perustuvaa ryhmittelyä tullaan tässä tutkimuksessa käyttämään myös terminaalitoimintoihin. Ryhmittely perustuu yleiseen tapaan jakaa kustannukset toiminta-asteen mukaan muuttuviin ja kiinteisiin kustannuksiin, kohdistamisen syy-yhteyden mukaan välittömiin ja välillisiin kustannuksiin sekä aiheuttamisen syy-yhteyden mukaan erillis- ja yhteiskustannuksiin (Oksanen 2003: 40).

Taulukko 1. Maantie- ja rautatiekuljetusten kustannusten ryhmittely (Oksanen 2003: 44 - 45).

MAANTIEKULJETUKSET	RAUTATIEKULJETUKSET
1. Kuljetustyökustannukset	1. Kuljetustyökustannukset
Kuljettajien palkat	Kuljettajien palkat
Välilliset palkkakustannukset	Välilliset palkkakustannukset
Muut miehistökustannukset (mm. päivärahat ja matkakustannukset)	Muut miehistökustannukset (mm. päivärahat ja matkakustannukset)
2. Kuljetuskaluston kustannukset	2. Kuljetuskaluston kustannukset
A. Kiinteät kustannukset	A. Kiinteät kustannukset
Pääomakustannukset (poistot+korot)	Pääomakustannukset (poistot+korot)
Vakuutusmaksut	Vakuutusmaksut
Liikennöimismaksut (ajoneuvoverot, katsastusmaksut)	Ylläpitokustannukset
Ylläpitokustannukset	Muut kiinteät kustannukset (esim. kulunvalvonta-, junansuorituskulut)
Korvaukseton ajo (vain hinnoittelulaskelmissa)	B. Muuttuvat kustannukset
Ajoneuvohallinnon kustannukset	Polttoainekustannukset
B. Muuttuvat kustannukset	Voiteluainekustannukset
Polttoainekustannukset	Korjaus- ja huoltokustannukset
Voiteluainekustannukset	Muut ostetut aineet, tarvikkeet ja ulkopuoliset palvelut
Korjaus- ja huoltokustannukset	
Rengaskustannukset	3. Kuljetusorganisaation kustannukset
3. Kuljetusorganisaation kustannukset	Kiinteät palkkakustannukset (välillisine palkkakustannuksineen)
Kiinteät palkkakustannukset (välillisine palkkakustannuksineen)	Toimitilojen kustannukset
Toimitilojen kustannukset	Puhelin- ja tietohallintokulut
Puhelin- ja tietohallintokulut	Markkinointi ja suhdetoiminta
Markkinointi ja suhdetoiminta	Vahinko- ja onnettomuuskulut
Taloushallinnon kulut	Tutkimus-, kehitys- ja koulutuskulut
Yrittäjän eläke- ja vastuuvakuutukset	Muut hallinto- ja yleiskulut
Markkinointi- ja ajovälitysmaksut	
Tutkimus-, kehitys- ja koulutuskulut	4. Tavarankäsittelykustannukset
Jäsenmaksut ym. hallintokulut	Kuljetusvakuutus
4. Tavarankäsittelykustannukset	Terminaali- ja käsittelykustannukset
Kuljetusvakuutus	Erikoiskuljetusten ja vaarallisten aineiden kuljetusten erilliskulut
Terminaali- ja käsittelykustannukset	Muut tavarankäsittelykustannukset (esim. alihankintatyöt)
TIR-maksut	
Muut tavarankäsittelykustannukset (esim. alihankintatyöt)	5. Väyläkustannukset
5. Väyläkustannukset	Ratamaksut
Tie-, silta- ja tunnelimaksut	Muut väyläkustannukset (esim. telinvaihtokustannukset)
Lauttamaksut	

2.2 Bioenergia

2.2.1 Bioenergian määritelmä ja käyttömäärät

Bioenergiaksi kutsutaan biopolttoaineilla tuotettua energiaa. Biopolttoaineita saadaan metsissä, soilla ja pelloilla kasvavista biomassoista, tietyistä orgaanisista jätteistä sekä levistä. Biopolttoaineet voivat olla kiinteitä, nestemäisiä tai kaasuja (Tietoa bioenergiasta... 2010). Lisäksi biopolttoaineiksi kutsuttujen polttoaineiden tulee olla uusiutuvia (Savon Voima Oy:n... 2001). Uusiutuvia energianlähteitä ovat esimerkiksi puu, vesi- ja tuulivoima, aurinkoenergia, lämpöpumpuilla tuotettu energia, kierrätyspolttoaineet ja peltobioenergia (Ylitalo 2011: 289). Uusiutuvuusvaatimuksesta johtuen esimerkiksi öljy ja kivihiili eivät ole biopolttoaineita, vaikka ne ovatkin syntyneet orgaanisista aineista. Turve on Suomessa määritelty hitaasti uusiutuvaksi biomassapolttoaineeksi (Crill ym. 2000). Turvekaan ei näin ollen ole varsinainen biopolttoaine.

Selvästi merkittävin biopolttoaineiden raaka-aine Suomessa on puu. Vuonna 2010 puupolttoaineet olivat Suomessa toiseksi merkittävin energialähde öljytuotteiden jälkeen. Energiaa tuotettiin puupolttoaineilla noin 86,7 TWh, joka on 21,5 % energian kokonaiskulutuksesta (Ylitalo 2011: 289). Fossiilisilla polttoaineilla tuotettiin edelleen kuitenkin lähes puolet (47 %) energian kokonaismäärästä. Suomessa käytettävistä uusiutuvista energialähteistä puupolttoaineet kattoivat vuonna 2010 noin 80 % (Ylitalo 2011: 289).

2.2.2 Metsästä saatava bioenergia

Puupolttoaineilla tuotettu energia voidaan jakaa suoraan metsästä saatavalla puulla tuotettavaan energiaan eli metsäenergiaan ja muilla puupohjaisilla polttoaineilla tuotettavaan energiaan, joka tuotetaan esimerkiksi metsäteollisuuden jäteliemillä ja puupohjaisella biodieselillä. Metsäenergiaa tehdään Suomessa hakkuutähteistä, kannoista ja pienpuusta (Ryymän ym. 2008: 7). Lisäksi jonkin verran käytetään pääasiassa Venäjältä tuotavaa järeää runkopuuta (Laitila ym. 2010: 26). Näistä käytetään yhteisnimitystä energiapuu. Ennen käyttöä energiapuu joko haketetaan tai murskataan. Näin käsitellystä energiapuusta käytetään yleisnimitystä metsähake.

Työ- ja elinkeinoministeriön (2010: 7) laatiman uusiutuvan energian velvoitepaketin mukaan metsähakkeen käyttö tulisi nostaa vuoteen 2020 mennessä 13,5 miljoonaan kuutiometriin. Vuonna 2010 metsähaketta käytettiin lämpö- ja voimalaitoksissa yhteensä 6,2 miljoonaa kuutiometriä (Ylitalo 2011: 290). Metsähakkeen käyttöä on siis varsin lyhyessä ajassa nostettava huomattavasti.

Hakkuutähteitä kerätään pääasiassa päätehakkuukohteilta (Hakkila 2004: 29), koska harvennuskohteilla niiden korjaaminen on kallista ja aiheuttaa helposti puustovaurioita. Hakkuutähteisiin luetaan kuuluvaksi sekä latvusmassa että hukkarunkopuu (Hakkila 2004: 30). Hakkuutähteiden korjuumäärät ovat täysin riippuvaisia ainespuuhakkuista. Hakkuutähteiden osuus lämpö- ja voimalaitosten käyttämästä metsähakkeesta oli vuonna 2010 noin 35 % (Ylitalo 2011: 290). Suomen vuotuinen hakkuutähteen tekninen korjuupotentiaali oli vuoden 2004 lukuihin perustuen 6,5 miljoonaa m³ (Laitila ym. 2010: 28).

Kantoja korjataan vain päätehakkuukohteilta (Hakkila 2004: 33). Myös kantojen korjuupotentiaalit ovat näin ollen täysin riippuvaisia päätehakkuista. Pääasiassa korjuu kohdistuu kuusen kantoihin, mutta myös männyn kantoja nostetaan. Vuonna 2010 kantojen osuus lämpö- ja voimalaitosten käyttämästä metsähakkeesta oli 16 % (Ylitalo 2011: 290). Suomen vuotuinen kuusen kantojen tekninen korjuupotentiaali oli 2,5 miljoonaa m³ vuonna 2004 (Laitila ym. 2010: 28).

Pienpuuta korjataan nuorten metsien harvennuksilta. Energiaksi käytettävä pienpuu on läpimitaltaan pääasiassa alle kuitupuun mittojen. Pienpuu voidaan korjata joko kokopuuna tai se voidaan karsia rangaksi. Kokopuuna korjaaminen nostaa kertymää ja myös työn tuottavuutta. Sillä voi kuitenkin olla pitkällä aikavälillä vaikutusta metsämaan ravinnetasapainoon, kun ravinteita paljon sisältäviä neulasia poistuu metsästä. Kokopuuhake ei myöskään ole laadultaan yhtä hyvä polttoaine kuin rankahake. (Hakkila 2004: 31 – 32.) Pienpuun korjuu ei ole suoraan riippuvainen ainespuukorjuusta. Tosin pienpuun ja ainespuun korjuuseen voidaan käyttää samaa kalustoa, mikä voi aiheuttaa välillistä riippuvuutta. Lämpö- ja voimalaitosten käyttämästä metsähakkeesta 40 % oli vuonna 2010 pienpuuta (Ylitalo 2011: 290). Lisäksi pienpuusta tehdyn hakkeen osuus kasvoi vuonna 2010 selvästi verrattuna

vuoteen 2009 (Ylitalo 2011: 290). Suomen vuotuinen pienpuun korjuupotentiaali oli 6,9 miljoonaa m³ vuonna 2004 (Laitila ym. 2010: 28).

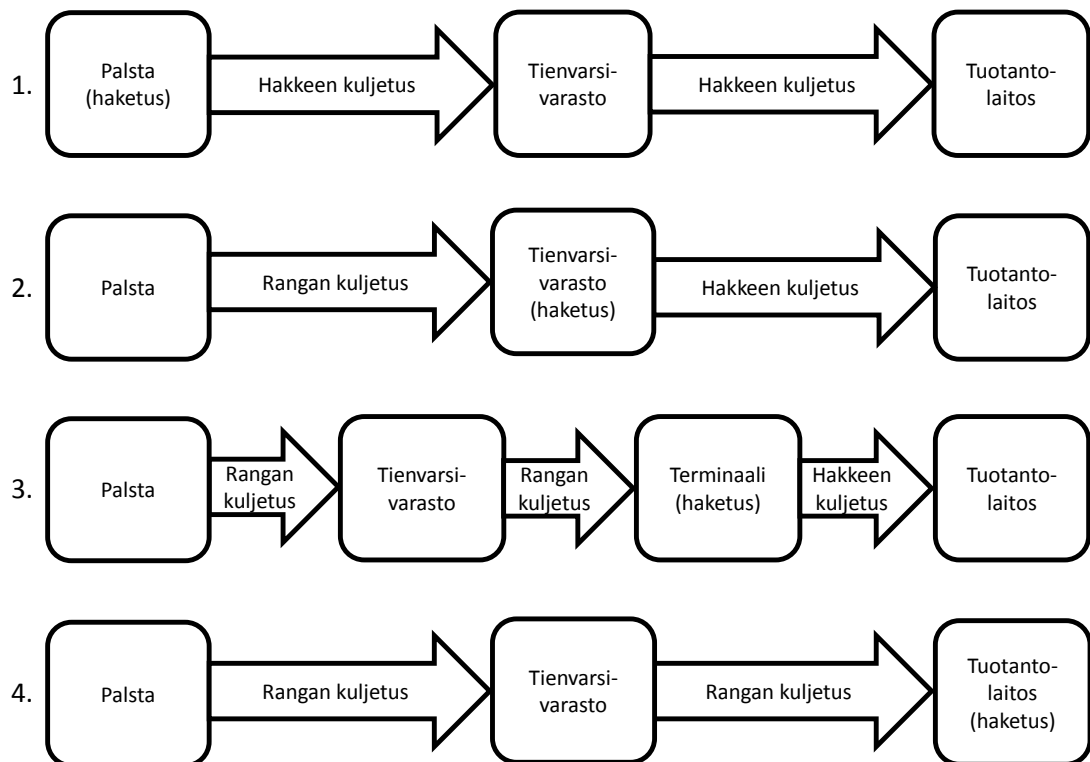
Kärhän ym. (2010a) tekemän arvion mukaan vuonna 2020 pienpuun osuus on noin puolet teoreettisesta energiapuun kokonaiskorjuupotentiaalista. Kuitenkin pienpuun osuus teknis-taloudellisesta kokonaiskorjuupotentiaalista on samana vuonna arvion mukaan vain alle kolmannes. Tämä kuvaa hyvin pienpuun käytön kannattavuuteen liittyviä haasteita ja mahdollisuuksia.

Tässä tutkimuksessa keskitytään pienpuun hankintaketjujen kustannusten selvittämiseen. Tähän päädyttiin pienpuun suuresta korjuupotentiaalista ja hankintaketjujen kehittämistarpeista sekä ainespuuhakkuuriippumattomuudesta johtuen. Pienpuussa keskitytään rankaan johtuen rangan korjuun pienemmästä ravinnehävikistä ja rankahakkeen kokopuuhaketta paremmasta laadusta.

2.3 Rangan hankintaketjut

2.3.1 Hankintaketjujen kuvaus ja käyttömäärät

Rangan hankintaketjuja määrittää erityisesti se, missä vaiheessa ketjua haketus tehdään. Haketus voidaan tehdä joko palstalla, tienvarressa, terminaalissa tai käyttöpaikalla (Kärhä 2011: 3409). Rangan hankintaketjut on esitetty kuviossa 1.



Kuvio 1. Rangan hankintaketjut haketusvaiheen perusteella luokiteltuna.

Palstahaketus tehdään palstahakkurilla, jolloin samassa koneessa on sekä varsinainen hakkuri että kuljetussäiliö tai perävaunu (Asikainen & Nuuja 1999: 480). Aina kuljetustilan täytyttyä palstahakkuri käy tyhjentämässä säiliön tienvarressa joko kasaan tai hakkeen kuljetukseen tarkoitettulle vaihtolavalle (Asikainen & Nuuja 1999). Tienvarresta hake ajetaan pääsääntöisesti suoraan käyttöpaikalle. Poikkeustapauksissa hake voi kiertyä vielä terminaalin kautta. Ennen palstahaketausta rangat saavat kuivua palstalla. Palstahaketuksen osuus haketetusta pienpuusta on vähentynyt 2000-luvun alkuun verrattuna (Strandström 2012: 13) ja nykyään käyttömäärät ovatkin erittäin pieniä (Laitila ym. 2010: 38). Syynä tähän ovat heikko kannattavuus pitkillä metsäkuljetusmatkoilla ja haastavilla korjuukohteilla (kivisyys, mäkisyys, heikosti kantavat maat) sekä lumen aiheuttamat ongelmat talvella (Kiema ym. 2005: 23) ja vikaherkkyys (Laitila ym. 2010: 38).

Tienvarsihaketus on nykyään selvästi käytetyin haketustapa. Noin 72 % pienpuusta hakettiin tienvarressa vuonna 2011 (Strandström 2012: 13). Selvästi merkittävin osa tästä tehtiin ketjulla, jossa hakeauto ja hakkuri ovat erillisiä yksiköitä. Integroidulla hakkuri-hakeauto ketjulla tehdyn hakkeen määrä oli viimeisimmän

tilastoinnin mukaan 4 % vuonna 2009 (Kärhä 2010: 12). Tienvarsihaketuksessa ranka kuivuu tienvarsi- ja kanto-alueilla yleensä puolesta vuodesta kahteen vuoteen ennen haketusta. Tienvarresta hake kuljetetaan pääsääntöisesti suoraan käyttöpaikalle, mutta voidaan poikkeustapauksissa kuljettaa myös terminaaliin. Hakkuri hakettaa suoraan hakeauton kuormatilaan. Koska hakkurin ja hakeauton toiminnot ovat toisiinsa ajallisesti kytkeytyneitä, on ketju haavoittuvainen ja keskeytyksille altis (Asikainen 1998: 386, Hakkila 2004: 39 – 40). Käytettäessä yhtä hakeautoa hakkuri joutuu aina odottamaan, kun hakeauto käy tyhjentämässä kuormansa. Useamman hakeauton tapauksessa hakeautot joutuvat mahdollisesti odottamaan hakkurille pääsyä. Tästä käytetään nimitystä kuumaketju -ilmiö (Asikainen 1998: 386, Laitila ym. 2010: 34 - 37, Kärhä 2011: 3409). Lisäksi satunnaiset tekijät kuten viivästymiset ja kuljetusmatkat vaikuttavat koko systeemin toimintaan (Asikainen 1995). Järeät tienvarsihakkurit ovat toimintavarmoja ja tehokkaita, mutta ongelmaksi muodostuvat terminaali- ja käyttöpaikkahaketuksen verrattuna matalat käyttöasteet ja työskentelytilan puute tienvarressa (Hakkila 2004: 40).

Terminaalihaketuksessa ranka kuljetetaan tienvarresta autolla terminaaliin, jossa haketus tehdään. Tästä eteenpäin hake kuljetetaan joko hakeautoilla ja/tai junalla käyttöpaikalle. Terminaalihaketukseen perustuvassa ketjussa energiapuun kuivumisesta voidaan huolehtia joko tienvarressa, terminaalissa tai osittain molemmissa. Vuonna 2011 terminaalihaketuksen osuus oli 18 % pienpuun kokonai- shaketusmääristä. Osuus kasvoi 8 prosenttiyksikköä vuodesta 2010 (Strandström 2012: 13).

Vuonna 2011 käyttöpaikalla tehtiin 10 % pienpuun haketuksesta (Strandström 2012: 13). Tämän menetelmän käyttäminen on kannattavaa vain kohteilla, joiden käyttömäärät ovat suuria (Ranta 2002: 46, Hakkila 2004: 42). Raskaat hakkurit tai murskaimet sopivat hyvin käyttöpaikkahaketuksen (Ranta 2002: 46). Ranka kuivuu joko tienvarressa tai käyttöpaikalla. Pääpaino on kuitenkin tienvarsi- kuivumisessa johtuen käyttöpaikkojen usein rajallisesta varastointitilasta. Ranka kuljetetaan tienvarresta suoraan käyttökohteelle umpilaidalliselle puutavara-autolla tai vaihtoehtoisesti lastausterminaaliin, josta junalla käyttökohteelle. Käyttöpaikkahaketuksen suurin ongelma on käsittelemättömän energiapuun

kuljettaminen, mikä tarkoittaa kiintokuutioissa mitattuna pieniä kuormakokoja (Ranta 2002: 46).

Tehokas tapa tiivistää pienpuuta paremmin kuljetettavaan muotoon on paalaus. Tätä menetelmä käytetään kuitenkin vain kokopuulle. Paalauksessa kokopuu tiivistetään sylinterin muotoisiksi paaleiksi, jolloin energiapuun käsiteltävyys ja kuljetusten tehokkuus paranee. (Ranta 2002: 44 – 45.)

2.3.2 Rangan hankintaketjujen erityispiirteet

Rangan hankintaketjuilla ja laajemmin energiapuun hankintaketjuilla on omat erityispiirteensä verrattuna luvussa 2.1 *Hankintaketjut ja kustannukset* kuvattuihin hankintaketjujen perusteisiin ja kustannuksiin. Ehkä selkein etu energiapuun hankintaketjuilla on kysynnän ennustamisen helppoudessa. Yleensä hakkeen toimittamisesta tehdään asiakkaiden kanssa pitkäaikainen sopimus, joka luo varmuutta toimintaan. Lisäksi esimerkiksi lämpölaitoksen hakkeen kysyntää ohjaa energian kulutus, joka Suomessa riippuu suuresti ilman lämpötilasta (Fredriksson ym. 2002: 30). Kysynnän ennustettavuus on hyvä, mutta vuodenaikainen kysynnän vaihtelu aiheuttaa tuotantokapasiteetin käytölle haasteita.

Suurilla laitoksilla hakkeen toimittaja vastaa usein siitä, että haketta on riittävästi käytettävissä eli laitosten varastojen hallinta on ulkoistettu hakkeen toimittajalle. Tämä on suhteellisen tasaista kysyntää ja pitkäaikaista toimitussopimusta ajatellen järkevä toimintatapa.

Toimitusten luotettavuus korostuu erityisesti lämpölaitostoimituksissa. Jos hake loppuu lämpölaitokselta, tarkoittaa tämä joko lämmityksen loppumista tai varajärjestelmien ylösajoa, jotka molemmat ovat kalliita vaihtoehtoja.

Tuotteen eli energiapuun laadunhallinta aiheuttaa ulko-olosuhteissa omat haasteensa. Varsinkin tienvarsivarastoinnissa varastopaikalla, pinon rakenteella ja sääolosuhteilla on suuri merkitys siihen kuinka laadukasta haketta pystytään tuottamaan. Laatutekijöistä tärkein on hakkeen kosteus (Hakkila 2004: 68, Laurila & Lauhanen

2010: 433). Terminaaliolosuhteissa laadunhallinta on tienvarsivarastointia helpompaa (Heikkilä ym. 2005: 35).

Energiapuun hankintaketjuissa on tyypillisesti hyvin pitkä varastointiaika verrattuna tuotanto- ja kulutushyödykkeisiin. Yleensä varastointi kestää puolesta vuodesta kahteen vuoteen. Pitkän varastointiajan tarkoituksena on energiapuun kuivuminen, jolloin sen lämpöarvo nousee, kuljetuskustannukset laskevat, käsiteltävyys helpottuu ja säilyvyys paranee (Hakkila 2004: 68). Karttusen ym. (2010: 65) sekä Laurilan ja Lauhasen (2010: 431) tekemien tutkimusten perusteella voidaan todeta, että vuoden varastointiajan jälkeen energiapuun kosteudet ovat yleisesti 30 – 40 % välillä olosuhteista riippuen.

Energiapuuta ei kannata säilyttää hakkeena pitkiä aikoja. Tärkeimmät syyt tähän ovat hakkeen itsesyttymisvaara, hakekasan pintaosien kosteuden kasvu ja rankana varastointiin verrattuna usein suuremmat kuiva-ainetappiot (Haikonen 2005: 10 – 11). Kuiva-ainetappioita syntyy sekä puun osien irtoamisen (mekaaninen hävikki) että puuaineessa tapahtuvien hajoamisprosessien takia. Hakettamattomallakin energiapuulla varastoinnin aikaiset kuiva-ainetappiot voivat nousta korkeiksi. Anerudin ja Jirjisin (2011: 264) sekä Petterssonin ja Nordfjellin (2007) tutkimuksissa energiapuun kuiva-ainetappiot olivat vuoden varastointiajalla 4 – 17 % välillä kokonaisuudesta. Varmuusvarastot on näin ollen järkevää säilyttää pääasiassa rankana ja tehdä haketus vasta juuri ennen kuljetusta. Hävikkiä muodostuu varastoinnin ohella väistämättä myös muissa hankintaketjun osissa (Laurila & Lauhanen 2012: 49 - 52), kuten haketuksessa sekä kuorman lastaamisessa ja purkamisessa.

2.3.3 Rangan hankintaketjujen kustannusselvitykset

Energiapuun hankintaketjujen kustannuksia kuljetusmatkan suhteen ovat viime aikoina selvittäneet ainakin Laitila & Väätäinen (2011) sekä Tahvanainen & Anttila (2011). Näistä Tahvanaisen ja Anttilan (2011) tutkimus perustuu yksittäisen laitoksen hankintaketjuihin. Laitilan ja Väätäisen (2011) tutkimus tarkastelee asiaa enemmän yleisellä tasolla.

Laitilan ja Väätäisen (2011) tutkimuksessa on tarkasteltu ainoastaan autokuljetuksia. Kustannukset on esitetty sekä koko hankintaketjulle (kannolta käyttökohteelle) että pelkästään kaukokuljetuksille. Tarkastelussa on useita energiapuumuotoja ja myös ranka on tarkastelussa mukana. Tahvanaisen ja Anttilan (2011) tutkimuksessa on tarkasteltu koko hankintaketjun kustannuksia (kannolta käyttökohteelle) eri energiapuumuodoilla ja kuljetustavoilla. Myös junakuljetukset ovat mukana tarkastelussa. Rangan osalta kustannuksia ei ole esitetty.

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan rangan hankintaketjujen kokonaiskustannuksia välillä tienvarsi – käyttökohde. Vertailua tehdään eri volyyymeilla ja kuljetusmatkoilla. Tarkasteltavana ovat sekä auto- että junakuljetukset. Pääpaino on terminaalien kautta kulkevien hankintaketjujen vertaamisessa suoraan autokuljetukseen.

2.4 Bioenergiaterminaalit

2.4.1 Bioenergiaterminaalien tulevaisuus ja toiminnan kannattavuus

Bioenergiaterminaalien ja bioenergian hankintaan liittyen on tehty viime vuosina useita erilaisia alueellisia tutkimuksia ja selvityksiä (esim. Kiema ym. 2005, Karjalainen 2006, Karttunen ym. 2010, Perälä ym. 2011 ja Seppänen 2011). Selvityksissä on pääasiassa käsitelty bioenergiaterminaalien sijaintia, toteutustapaa ja toiminnan kannattavuutta. Viime aikoina kasvanut kiinnostus bioenergiaterminaalien kohtaan johtuu pääasiassa bioenergian suurista tulevaisuuden käyttötavoitteista (Työ- ja elinkeinoministeriö 2010), mikä tarkoittaa myös entistä laajamittaisempaa bioenergian jalostusta ja varastointia. Bioenergiaterminaalien määrä ja kapasiteetti tuleekin hyvin todennäköisesti kasvamaan tulevaisuudessa.

Bioenergiaterminaalien on hyvin monentasoisia. Bioenergiaterminaalien nimityksen alla on metsäteiden varrella sijaitsevia koontivarastoja, jotka eivät poikkea tavanomaisista tienvarressa olevista energiapuuvarastoista muutoin kuin suuremmalla varastointikapasiteetilla. Toisessa ääripäässä ovat asfaltoidut terminaalialueet, joissa on jalostustoimintaa (Rinne ym. 2010: 125). Mahdollisia ovat

myös erilliset katetut varastotilat, joissa hake säilyy kuivana sekä erillinen lastaus-/kuormauspalvelu (Rinne ym. 2010: 127).

Selvästi merkittävin osuus nykyisin terminaalien kautta kulkevista biopolttoaineista on energiapuuta (Perälä ym. 2011). Myös esimerkiksi turvetta ja ruokohelpeä voidaan terminaaleissa varastoida. Tässä tutkimuksessa tarkastellaan terminaalien toimintaa pelkästään energiapuun käytön kannalta. Energiapuu voidaan tuoda terminaaliin täysin polttokelpoiseen muotoon jalostettuna, osittain jalostettuna tai jalostamattomana. Terminaalista biopohjainen raaka-aine viedään joko polttolaitoksille tai jatkojalostettavaksi esimerkiksi biodiesel-/bioetanolilaitokseen.

Bioenergiaterminaalit ovat biopolttoaineiden varastointi- ja jalostuspaikkoja. Ne toimivat puskurivarastoina ja lisäävät toimitusvarmuutta hankintaketjuissa tapahtuvien poikkeamien aikaan (Rinne ym. 2010: 126, Perälä ym. 2011: 29). Jalostustoiminta tarkoittaa yleensä biopolttoaineiden kuivaamista tai muokkaamista paremmin hyödynnettävään muotoon. Puuperäisten biopolttoaineiden tapauksessa muokkaaminen tarkoittaa yleensä puuaineen haketusta tai murskausta pienemmäksi jakeeksi (Rinne ym. 2010: 125).

Bioenergiaterminaalien toiminnan kannattavuuden kannalta on tärkeää, että sen kautta kulkee riittävä määrä energiapuuta ja myös varaston kiertonopeudella on suuri merkitys (Allen ym. 1998: 476, Rinne ym. 2010: 127 - 133). Riittävällä volyyymilla saadaan terminaaliin tehdyt investoinnit katettua ja pystytään täysimääräisesti hyödyntämään terminaalin mahdollistamia skaalaetuja. On tärkeää huomioida, että samantasoistenkin terminaalien investointikustannukset voivat vaihdella selvästi paikasta riippuen. Impolan ja Tiihosen (2011: 34) mukaan tähän vaikuttavat erityisesti maasto-olosuhteet ja tarvittava oheisrakentaminen. Terminaalin tulisi olla paikka, jossa jalostusastetta nostetaan esimerkiksi murskaamalla/hakettamalla, kuivaamalla tai valmistamalla pellettejä tai muita biopolttoainejalosteita. Pelkkä varmuusvarastoinnin tuoma etu ei yleensä tee terminaalista taloudellisesti kovin kannattavaa (Rinne ym. 2010: 138). Impola ja Tiihonen (2011: 36) ovat esittäneet, että autokuljetuksiin pohjautuva terminaalitoiminta voisi olla kannattavaa 100 km ylittävillä kuljetusetäisyyksillä.

Bioenergiaterminaalien kautta kulkevan hankintaketjun käyttöä voidaan perustella viime kädessä vain sen paremmalla kannattavuudella verrattuna kilpaileviin ketjuihin. Kannattavuus voi perustua energiapuun jalostusvaiheen korkeampaan tehokkuuteen tai parempaan laatuun, kuuma ketju -ilmiön vaikutusten vähenemiseen ja toimitusvarmuuden paranemiseen. Kannattavasti toimivat bioenergiaterminaalit edellyttävät sekä hankinta-, toimitus- ja jalostusketjujen kehittämistä että taloudellisesti kannattavien liiketoimintamallien luomista (Perälä ym. 2011: 3).

2.4.2 Bioenergiaterminaalien edut ja haitat

Bioenergiaterminaalit lisäävät hakkeen toimitusvarmuutta. Varsinkin kelirikon aikaan terminaalit ovat toimitusvarmuuden kannalta usein välttämättömiä (Laitila ym. 2010: 37). Myös muut säästä johtuvat ilmiöt voivat aiheuttaa ongelmia hakkeen toimitusketjuille. Yllättäviin sääilmiöihin reagoiminen aiheuttaa aina myös kustannuksia. Esimerkiksi myöhään alkavat pakkaset estävät penkkateiden käytön, jolloin haketta on saatava muualta. Talvella myös esimerkiksi teiden auraaminen tienvarsivarastoille lisää kustannuksia. Toimitusvarmuus on tärkeä tekijä toimitusketjuissa, mutta ongelmallista on, että toimitusvarmuudella on vaikea esittää selkeää hintaa.

Terminaalissa haketustyön organisointi on helppoa, koska siirtoja ei ole työmaan sisällä. Huollot ja korjaukset on myös helppo järjestää. Koneiden käyttöasteet nousevat tienvarsihaketusta korkeammiksi. Hakkeen laadun kontrollointi on myös helppoa, koska terminaalia voidaan käyttää energiapuun kuivatuspaikkana, ja kuivaa ja kostea haketta voidaan tarvittaessa sekoittaa keskenään. Hakkeen laatua nostaa myös asvalttikenttävarastointi, mikä vähentää epäpuhtauksien pääsyä hakkeen joukkoon. Asvalttikentällä myös työskentelyolosuhteet ovat tienvarsivarastoa paremmat. Terminaali soveltuu lisäksi erinomaisesti kahden eri kuljetusmuodon liityntäpaikaksi. Lisäksi mahdollisuus käyttää suuria ja tehokkaita terminaalihakkureita/-murskaimia parantaa tuottavuutta. (Heikkilä ym. 2005: 35, Karttunen ym. 2010: 125.)

Huonoina puolina terminaalihaketuksessa ovat suuri varastotilan tarve, terminaalin korkeat rakentamiskustannukset ja kuljetuskustannukset. Kuljetuskustannukset

kasvavat, koska terminaalien kautta kulkevat hankintaketjut ovat useimmiten pidempiä kuin suoraan autokuljetukseen perustuvat hankintaketjut. Energiapuun kuljettaminen hakettamattomana terminaalisiin tarkoittaa myös autojen kuljetuskapasiteetin vajaakäyttöä, koska autojen kokonaiskantavuutta ei päästä hyödyntämään. Lisäksi työvaiheiden lukumäärä ja kustannukset kasvavat, koska lastauksia ja purkamisia tulee lisää. (Heikkilä ym. 2005: 35, Karttunen ym. 2010: 125.)

2.5 Rautateiden merkitys energiapuun kuljetuksissa

Kasvavat metsäenergian käyttömäärät johtavat kuljetusmatkojen pidentymiseen, koska enää ei voida käyttää vain taloudellisesti kannattavimpia, käyttöpaikkaa lähellä olevia, energiapuuvarantoja. Tämä nostaa esiin ajatuksen rautateiden nykyistä laajemmasta käytöstä energiapuun kuljetuksiin. Aiemman tutkimustiedon perusteella rautateiden käyttö on todettu autokuljetuksia kannattavammaksi keskimäärin 150 km ylittävillä etäisyyksillä (Enström 2009: 4, Pihlajamäki & Salo 2010: 41, Tahvanainen & Anttila 2011). Tämä etäisyys tullaan tulevaisuudessa saavuttamaan todennäköisesti useassakin energiapuun hankintaketjussa.

Torvelaisen (2011: 207) selvityksen perusteella vuonna 2010 kaikista raakapuun (energiapuun lisäksi mukana myös ainespuu) kaukokuljetuksista 73 % (m^3) tehtiin autokuljetusketjulla, 24 % rautatiekuljetusketjulla ja loput vesitiekuljetusketjulla. On lisäksi huomattava, että sekä rautatiekuljetusketjuun että vesitiekuljetusketjuun kuuluu alku- ja loppukuljetuksina autokuljetuksia. Tämä lisää vielä selvästi autokuljetuksien kokonaismäärää. Autokuljetukset ovat näin ollen nykytilanteessa selvästi merkittävin raakapuun ja myös energiapuun kuljetusmuoto. Keskimääräinen raakapuun autokuljetusketjun pituus vuonna 2010 oli 110 km. Rautatiekuljetusketjun pituus oli tähän verrattuna noin kolminkertainen (315 km) (Torvelainen 2011: 207).

Sarasen (2009: 54) tutkimuksen mukaan paremmalla toiminnan suunnittelulla raakapuun kuljetusten kustannukset saadaan tiputettua jopa 57 % toteutuneista kustannuksista. Tämä vaatii korkeaa 80 % kapasiteetin käyttöasteetta. Käyttöasteella 60 – 70 % kustannukset nousevat 80 % käyttöasteeseen verrattuna 6 – 11 %. Tämä kertoo toisaalta rautatiekuljetusten suurista pääomakustannuksista ja käyttöasteiden

merkityksestä, mutta ennen kaikkea kuljetusten merkittävästä tehostamispotentiaalista. Rautateiden tavaraliikenteen kilpailun avautumisen (vuosi 2007) ja uusien kilpailijoiden tulon markkinoille voidaan olettaa tehostavan toimintaa, jolloin rautatiekuljetukset voisivat olla kannattavampia lyhyemmilläkin kuljetusmatkoilla (Iikkanen & Siren 2005: 59). Rautatiekuljetukset tarvitsevat kannattaakseen yleensä suuria volyymeita. Vahvoissa tavaravirroissa ja suorissa yhteyksissä, joissa ei tarvitse tehdä vaihtotyötä, voivat rautatiekuljetukset olla maantiekuljetuksia edullisempia jo alla 50 km matkalla (Iikkanen & Siren 2005: 58).

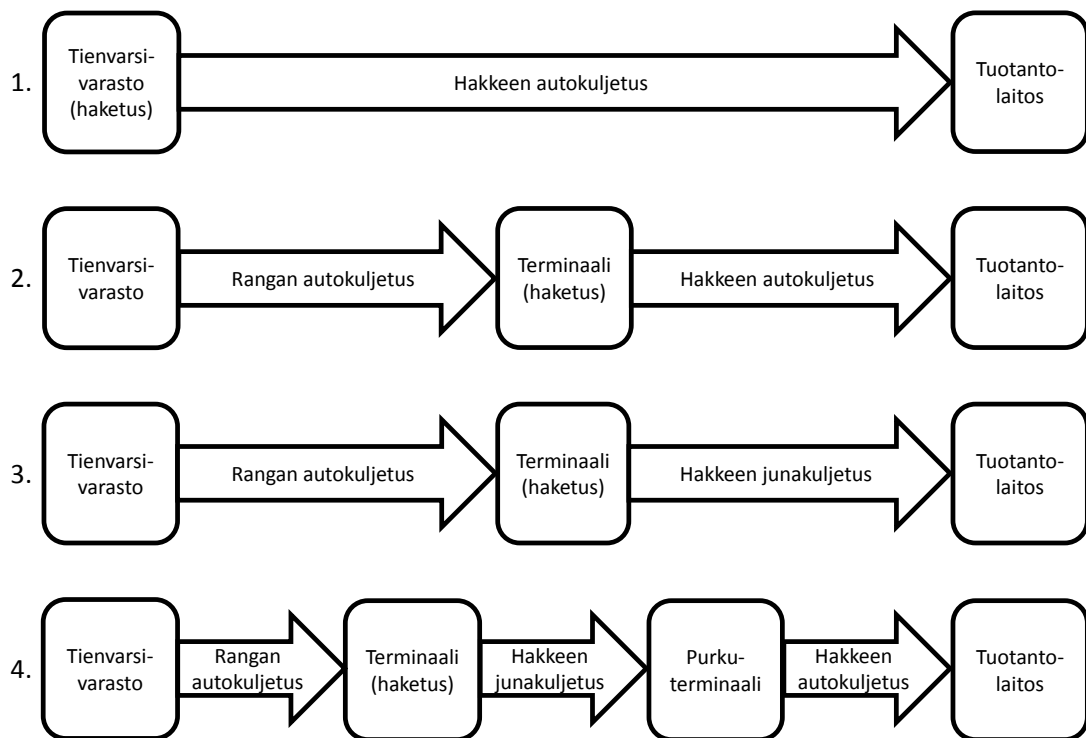
Rautatieterminaalien tapauksessa varsinaisen jalostusterminalin tulisi sijaita lähellä energiapuuvarantoja, jotta autokuljetuksen osuus jäisi pieneksi. Vastaavasti kuorman purku tulisi tehdä mahdollisimman lähellä käyttöpaikkaa. Näin päästään mahdollisimman paljon hyödyntämään edullista rautatiekuljetusta. Tässä tutkimuksessa junan purkamista kokeiltiin sekä käyttökohteelle että erillisessä purkuterminaalista, josta hake kuljetettiin autoilla käyttökohteelle. Rautatiet ovat mahdollisuus energiapuun kuljetuksissa erityisesti alueilla, joilla käyttöä on paljon eli joko useita pieniä laitoksia tai yksi iso laitos. Kovin hajallaan olevia pieniä laitoksia rautatiet palvelevat huonosti.

Rautateiden käytettävyyttä heikentää rataverkon kunto. Rataverkko on heikoimmassa kunnossa usein juuri niillä alueilla, joilla energiapuuta olisi parhaiten saatavissa (Tahvanainen & Anttila 2011: 3361). Nämä alueet sijaitsevat pääasiassa Itä- ja Pohjois-Suomessa. Osa rataosuuksista on jopa kokonaan suljettu.

3. AINEISTO JA MENETELMÄT

3.1 Käytetty aineisto

Tutkimusaineistona käytettiin tietoja energiapuun hankintaketjujen rakenteesta, toiminnasta ja kustannuksista. Energiapuun hankintaketjuja on kuvattu useissa aiemmissa tutkimuksissa (esim. Hakkila 2006 ja Ryymin ym. 2008), joiden pohjalta niiden rakennetta ja toimintaa on selvitetty. Tässä tutkimuksessa keskityttiin rangan hankintaketjuihin. Hankintaketjujen kustannuksia selvitettiin aiemman tutkimustiedon ja alan toimijoille tehtyjen kyselyiden avulla.



Kuvio 2. Vertailtavat hankintaketjut.

Tutkimuksessa vertailtiin neljän eri hankintaketjun toimintaa (kuvio 2). Ensimmäinen hankintaketju muodostettiin yleisimmin käytetyn eli tienvarsihaketukseen perustuvan rangan hankintaketjun mukaan. Tämän ketjun mukanaolo nähtiin tärkeäksi, jotta terminaalin kautta kulkeville ketjuille saatiin vertailuarvoja. Toinen hankintaketju muodostettiin kulkemaan terminaalin kautta. Tässä ketjussa ranka kuljetettiin sellaisenaan terminaaliin, jossa se haketettiin ja kuljetettiin hakeautolla suoraan käyttökohteelle. Kolmas hankintaketju oli muilta

osin yhtenevä toisen hankintaketjun kanssa, mutta tässä vaihtoehdossa hake kuljetettiin terminaalista käyttökohteelle junalla. Neljäs hankintaketju poikkesi kolmannesta hankintaketjusta siten, että juna purettiin erillisessä purkuterminaalista, josta hake kuljetettiin hakeautolla käyttökohteelle.

Näiden neljän hankintaketjun mukanaolo mahdollistaa toisaalta terminaalin kautta kulkevien hankintaketjujen vertailun tienvarsihakemukseen pohjautuvaan ketjuun ja toisaalta rautatiekuljetusten vertailun maantiekuljetuksiin. Lisäksi erillisen purkuterminaalien käyttäminen hankintaketjussa 4 mahdollistaa kuormaamisen ja purkamisen kustannusvaikutusten havainnoinnin. Kaikki tarkastellut hankintaketjut alkoivat tienvarressa olevasta rankavarastosta ja päättyivät käyttöpaikalle.

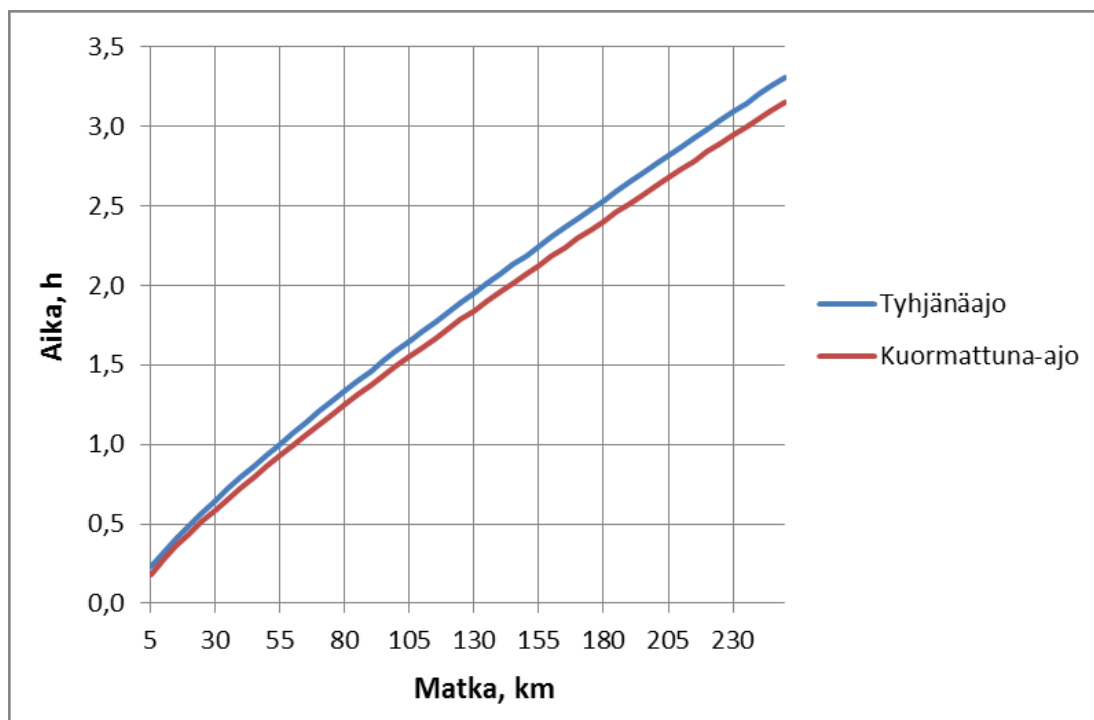
3.1.1 Hankintaketjujen toiminta

Ensimmäinen hankintaketjuista perustuu hakkeen suoraan autokuljetukseen ja tienvarsihakemukseen. Hakeauton kuljetuskapasiteettina tutkimuksessa käytettiin 120 i-m³ (Halonen & Vesisenaho 2002, Kuitto 2005: 305) ja hakkurin käyttötuntituotoksena 100 i-m³/h (Kärhä ym. 2011: 26, Laitila & Väätäinen 2011: 114). Käyttötuntituotoksessa ei ole huomioitu tienvarsivarastojen välisiin siirtoihin kuluvaa aikaa. Sen sijaan työpistesierrot (yksittäisellä varastopaikalla tapahtuvat siirrot), huollot, hakemukseen valmistautuminen, kasan järjestely, jälkityöt ja alle 15 minuutin keskeytykset on huomioitu (Laitila & Väätäinen 2011: 112). Hakkuri tuotti haketta suoraan auton kuormatilaan eli haketusnopeus oli sama kuin kuormausteho. Kuorman täytyttyä hakkuri odotti seuraavan hakeauton saapumista kuormattavaksi. Useamman hakeauton tapauksessa myös hakeautot saattoivat joutua jonottamaan kuormattavaksi pääsyä. Tämä riippui kuljetusetäisyydestä sekä kuormaustehosta ja purkunopeudesta.

Tienvarsivarastojen välisenä etäisyytenä pidettiin 21 km (Kuitto ym. 1994, Ikäheimo & Asikainen 1999: 494) ja yksittäisen tienvarsivaraston rankamääränä 150 m³ (Laitila ym. 2004: 16). Aina tienvarsivaraston tyhjennyttyä hakkuri siirtyi seuraavalle kohteelle. Hakkurin tienvarsivarastojen välisenä siirtonopeutena käytettiin samaa arvoa kuin kuormatuilla hakeautoilla.

Hakeautojen liikkumisen nopeus tienvarsivarastojen ja käyttökohteen välillä riippui kuljetusmatkasta kuvion 3 mukaan. Hakeauton purkunopeutena käyttökohteelle käytettiin $260 \text{ m}^3/\text{h}$ (Laitila & Väätäinen 2011: 114). Hakeautot ajoivat käyttökohteelle aina täysillä kuormilla, jos mahdollista. Mikäli kuorma ei täyttynyt tienvarsivarastolla, hakeauto siirtyi hakkurin perässä täydentämään kuormaa seuraavalle varastolle. Kuormaus oli luonnollisesti pysähdyksissä siirtymisen aikana. Tienvarsivarastoissa oleva energiapuu tyhjennettiin tutkimuksessa kokonaan riippumatta siitä oliko viimeinen kuorma vajaa vai täysi.

Rangan oletettiin kuivuneen vuoden ajan tienvarsivarastossa ennen kuljetusten aloittamista, johon pohjautuen laskettiin rangan varastoinnista syntyvät pääomakustannukset. Simuloinnin maksimikesto aika oli 30 vuorokautta.



Kuvio 3. Matkan vaikutus kuljetusaikaan tyhjänä- ja kuormattuna-ajossa (Asikainen ym. 2001: 58).

Toisessa hankintaketjussa ranka kuljetettiin tienvarresta terminaaliin, jossa se haketettiin ja kuljetettiin edelleen hakeautolla käyttökohteelle. Ranka-auton kuljetuskapasiteettina käytettiin 40 m^3 , kuormausnopeutena $72 \text{ m}^3/\text{h}$ ja purkunopeutena terminaalissa $83 \text{ m}^3/\text{h}$ (Laitila & Väätäinen 2011: 109 - 114). Rankautot lähtivät tienvarsivarastolta säännöllisin väliajoin. Väliajan pituus riippui

autojen määrästä ja kuljetusmatkasta. Ranka- ja hakeautojen ajonopeudet pohjautuivat kuvioon 3. Terminaali oli kooltaan 5 ha ja sinne mahtui maksimissaan 50000 m³ energiapuuta (Impola & Tiihonen 2011: 10). Sekä hakkeelle että rangalle oli mahdollista määrittää terminaalissa oma maksimitasonsa. Sekä kuljetus että haketus pysähtyivät automaattisesti määritettyjen maksimitasojen kohdalla.

Hakkurin käyttötuntituotoksena käytettiin lukuarvoa 220 i-m³/h (Kärhä & Mutikainen 2011: 18). Haketustuottavuus oli näin ollen terminaalissa 120 i-m³/h korkeampi kuin tienvarressa. Tutkimustiedon lisäksi käyttötuntituottavuuksia selvitettiin myös hakeurakoitsijoilta. Ero haketusnopeuksissa johtuu toisaalta terminaalissa käytettävästä tienvarsihakkuria järeämmästä hakkurista ja toisaalta tienvarren vaikeammista työolosuhteista sekä työpistesiirojen suuremmasta määrästä. Hakeauton kuormaus hoidettiin pyöräkuormaajalla, jonka kuormausnopeudeksi terminaalissa arvioitiin 420 i-m³/h ja purkunopeudeksi käyttöpaikalla 260 i-m³/h (Laitila & Väätäinen 2011: 114, Tahvanainen & Anttila 2011: 3366). Hakeauton kuormaus käynnistyi vasta, kun terminaalissa oli haketta vähintään yhden hakeauton kuorman verran. Hakeauton kuorman täytyttyä pyöräkuormaaja odotti seuraavan hakeauton saapumista kuormattavaksi tai vaihtoehtoisesti hakeauto jonotti kuormattavaksi pääsyä. Hakeauton purkaminen käyttökohteella tapahtui kippaavalla kuormatilalla.

Kolmas hankintaketju oli muutoin samanlainen kuin hankintaketju 2, mutta tässä ketjussa hake kuljetettiin terminaalista käyttökohteelle junalla. Myös junan liikkumisen nopeus terminaalin ja käyttökohteen välillä perustui kuvioon 3. Junan kuljetuskapasiteetti oli 2400 i-m³. Kuormausnopeutena käytettiin samaa 420 i-m³/h arvo kuin hakeautoillakin, mutta purkunopeus käyttöpaikalla oli 475 i-m³/h (Tahvanainen & Anttila 2011: 3366). Junan kuormaus käynnistyi vasta, kun terminaalissa oli rankaa ja haketta yhteensä riittävästi yhteen junakuormaan. Purkamiseen käytettiin pyöräkuormaajaa. Käytettävissä oli vain yksi veturi ja vaunukerta eli junan oli tehtävä edestakainen matka terminaalin ja käyttökohteen välillä ennen kuin kuormausta voitiin jatkaa.

Neljäs hankintaketju poikkesi hankintaketjusta kolme loppukuljetuksen osalta. Tässä hankintaketjussa juna purettiin purkuterminalissa, josta hake kuljetettiin

käyttökohteelle hakeautoilla. Hakeautojen liikkuminen purkuterminaalien ja käyttökohteen välillä sekä kuormaus ja purku perustuivat edellä mainittuihin arvoihin.

Kaikille hankintaketjuille tehtiin simuloinnit eri kuljetusmatkoilla. Terminaalien kautta kulkeville ketjuille tehtiin simulointeja myös eri volyymeilla. Volyymilla oli hankintaketjuissa vaikutusta ainoastaan terminaalien kustannuksiin, koska terminaali oli omassa omistuksessa. Muut ketjun toiminnot ostettiin alihankkijoilta aina todellisen tarpeen mukaan, jolloin yksikköä (m^3) kohti kustannukset säilyivät samana volyymista riippumatta. Kaluston määrä määritettiin simuloinneissa siten, että odotusajat minimoituivat.

Simuloinnin kesto aika pyrittiin määrittämään mahdollisimman lähelle 30 vuorokautta. Lisäksi pyrittiin siihen, että kuljetusvirta jakaantuu tasaisesti koko 30 vuorokauden ajalle. Tarvittaessa kuljetuksissa ja tienvarsihaketuksessa saattoi olla muutaman päivän taukoja, jos se oli ketjun kokonaiskannattavuuden kannalta järkevää. Työpäiviä viikossa oli viisi ja päivittäinen työaika 8 h. Tienvarsivarastot tyhjennettiin simuloinneissa kokonaan riippumatta siitä oliko viimeinen kuorma vajaa vai täysi. Sen sijaan terminaalista ajettiin vain täysillä kuormilla.

Simulointimalli huomioi rangan oletetun vuoden kuivumisajan tapahtuvan ennen simuloinnin alkua. Tämä pätee hankintaketjussa 1, jossa varastointia on pelkästään tienvarressa. Terminaalien kautta kulkevissa ketjuissa merkittävä osa kuivumisajasta kuluu kuitenkin terminaalissa. Tämä tulee ottaa tulosten arvioinnissa huomioon, koska kuljetuskustannukset terminaaliin syntyvät todellisessa tilanteessa mallin esittämää aiemmin.

3.1.2 Hankintaketjujen kustannukset

Hankintaketjujen kustannusten laskennassa käytetyt lukuarvot on esitetty taulukossa 2. Lukuarvojen lähteet ja laskentaperusteet kuvataan tarkemmin tämän luvun tekstissä.

Haketyöntekijän ja pyöräkuormaaajankuljettajan työkustannukset terminaalissa on laskettu määritettyjen päivittäisten työtuntien mukaan riippumatta siitä, onko terminaalissa haketettavaa rankaa tai autoa/junaa kuormattavana. Ranka- ja hakeauton kuljettajien sekä veturin kuljettajan työkustannukset on laskettu todellisten ajo-, kuormaus- ja purkuaikojen mukaan eli odottelusta ei ole maksettu. Myös tienvarsihaketuksen työkustannukset perustuvat todellisiin käyttötunteihin ilman odotusaikoja. Ajot on kuitenkin pyritty järjestämään niin, että odotusajat minimoituvat.

Taulukko 2. Kustannusten laskennassa käytetyt lukuarvot.

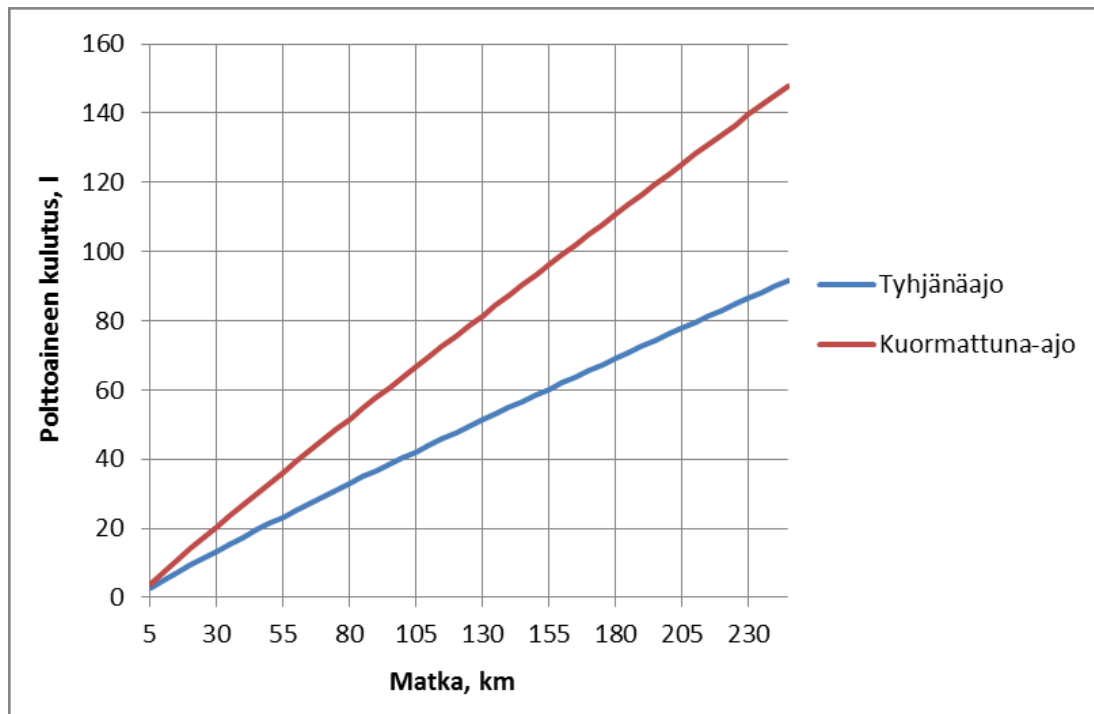
1. Työkustannukset		2.1.3 Liikennöimis maksut	
1.1 Palkat		Ranka- ja hakeauton liikennöimis maksut	1800 €/vuosi
Ranka- ja hakeautonkuljettaja	14 €/h	Hakkurin liikennöimis maksut	1800 €/vuosi
Haketyöntekijä	14 €/h	2.2 Muuttuvat kustannukset	
Pyöräkuormaajankuljettaja	14 €/h	2.2.1 Polttoainekustannukset	
Veturinkuljettaja	20 €/h	Ranka- ja hakeauton polttoaineen kulutus tyhjänäajossa	59,928*ajomatka ^(-0,087) l/100 km
Välilliset palkkakustannukset	+ 68 % palkkakustannuksiin	Ranka- ja hakeauton sekä hakkurin polttoaineen kulutus kuormattuna	83,445*ajomatka ^(-0,087) l/100km
2. Kuljetuskaluston ja terminaalin kustannukset		Junan polttoaineen kulutus	3 l/1000 btkm
2.1 Kiinteät kustannukset		Ranka- ja hakeautojen pysähdysten aikainen polttoaineen kulutus	8 l/kuorma
2.1.1 Pääomakustannukset		Pyöräkuormaajan polttoaineen kulutus	18 l/käyttötunti
Ranka-auton hankintahinta	330 000 €	Hakkurin polttoaineen kulutus	
Hakeauton hankintahinta	300 000 €	- terminaali	0,4 l/i-m ³
Ranka- ja hakeauton pitoaika	4,5 v	- tienvarsi	0,5 l/i-m ³
Ranka- ja hakeauton arvonaleneminen	25 %/vuosi	Polttoöljyn hinta (alv:ton)	0,9 €/l
Veturin hankintahinta	3,5 milj. €	Dieselin hinta (alv:ton)	1,1 €/l
Veturin pitoaika	25 v	2.2.2 Korjaus-, huolto- ja tarvikkekustannukset	
Veturin arvonaleneminen	18 %/vuosi	Ranka- ja hakeauton huolto- ja ylläpitokustannukset	0,2 €/km
Hakevaunun hankintahinta	150 000 €	Veturin huolto- ja ylläpitokustannukset	22,5 €/käyttötunti
Hakevaunun pitoaika	30 v	Hakevaunun huolto- ja ylläpitokustannukset	3000 €/vuosi
Hakevaunun arvonaleneminen	18 %/vuosi	Pyöräkuormaajan huolto- ja ylläpitokustannukset	5000 €/vuosi
Pyöräkuormaajan hankintahinta	210 000 €	Rangan hinta tienvarressa	25 €/m ³
Pyöräkuormaajan pitoaika	20 v	Terminaalin perustamiskustannukset	100 €/m ²
Pyöräkuormaajan arvonaleneminen	20 %/vuosi	Terminaalilirautatien rakentamiskustannukset	1,18 milj. €
Hakkurin hankintahinta		Terminaalin käyttöaika	30 v
- terminaali	700 000 €	Pääoman korko	4 %
- tienvarsi	500 000 €	Käyttötunnit	
Hakkurin pitoaika	5 v	- hakeauto	2600 h/vuosi
Hakkurin arvonaleneminen	18 %/vuosi	- ranka-auto	2600 h/vuosi
Rangan hinta tienvarressa	25 €/m ³	- pyöräkuormaaja	1200 h/vuosi
Terminaalin perustamiskustannukset	100 €/m ²	- juna	2600 h/vuosi
Terminaalilirautatien rakentamiskustannukset	1,18 milj. €	2.1.2 Vakuutus maksut	
Terminaalin käyttöaika	30 v	Ranka- ja hakeauton vakuutusmaksut	4500 €/vuosi
Pääoman korko	4 %	Veturin ja vaunujen vakuutusmaksut yht.	40000 €/vuosi
Käyttötunnit		Pyöräkuormaajan vakuutusmaksut	750 €/vuosi
- hakeauto	2600 h/vuosi	Hakkurin vakuutusmaksut	10000 €/vuosi
- ranka-auto	2600 h/vuosi	4. Väyläkustannukset	
- pyöräkuormaaja	1200 h/vuosi	Ratamaksut (perusmaksu+ratavero)	0,00235 €/btkm
- juna	2600 h/vuosi	5. Toimintaylijäämä	
2.1.2 Vakuutus maksut		Toimintaylijäämä yhteensä	5 % kokonaiskustannuksista
Ranka- ja hakeauton vakuutusmaksut	4500 €/vuosi		
Veturin ja vaunujen vakuutusmaksut yht.	40000 €/vuosi		
Pyöräkuormaajan vakuutusmaksut	750 €/vuosi		
Hakkurin vakuutusmaksut	10000 €/vuosi		

Pääomakustannukset eli korot ja poistot on kohdistettu kalustolle terminaalialuetta ja siellä käytettävää kalustoa lukuun ottamatta keskimääräisiin vuotuisiin käyttötunteihin perustuen. Tämä on yleisesti käytetty ja toimiva tapa. Tilanteessa, jossa yksi toimija tarjoaa vain vähän töitä, on auto- tai hakkuriurakoitsijan tehtävä töitä useammalle toimijalle. Tällöin pääomakustannuksia ei pysty järkevästi kohdistamaan ilman arviota vuotuisista käyttötunneista. Ranka- ja hakeautoille sekä junalle kohdistuu pääomakustannuksia kaikilta niiden käyttötunneilta. Käyttötunteihin on luettu kuormaukseen, purkuun ja varsinaiseen ajoon kuluva aika. Tienvarsihaketuksen tapauksessa myös hakeautojen siirtymät varastojen välillä luetaan käyttötunteihin. Tienvarsihakkurilla käyttötunteja ovat siirtymät varastoille ja haketustoiminta. Käyttötunteihin perustuvaa laskentaa hyödynnetään myös purkuterminalin ja käyttökohteen pyöräkuormaajille.

Terminaalista tulee pääomakustannuksia koko siltä ajalta, kun siellä säilytetään rankaa tai haketta. Edelleen terminaalihakkurista tulee pääomakustannuksia haketuksen alusta aina siihen asti, kun viimeinenkin ranka on hakettu. Pyöräkuormaajan pääomakustannukset terminalissa alkavat, kun terminaliin tulee ensimmäinen autokuorma ja loppuvat, kun viimeinen auto/juna on kuormattu.

Pitoajanaikaiset poistot laskettiin huomioiden kaluston keskimääräinen pitoaika ja arvonalenemisprosentti. Pääoman korkona käytettiin 4 %. Vuotuiset pääomakustannukset muutettiin käyttötuntikohtaisiksi, jotta kustannusten kehittymistä voitiin seurata simuloinnin edetessä. Vakuutusmaksut ja liikennöimismaksut (katsastusmaksu + ajoneuvovero) muutettiin myös samasta syystä käyttötuntikohtaisiksi.

Autokaluston ajokilometreistä muodostuvat polttoainekustannukset laskettiin autoille Väkevän ym. (2004) esittämällä ajomatkaan perustuvilla laskukaavoilla (kuvio 4). Lisäksi autokalustolle laskettiin kuormakohtainen pysähdysten aikainen polttoaineen kulutus. Tämä pitää sisällään kuormaamisen ja purkamisen aikaisen polttoaineen kulutuksen. Hakkurin siirrosta syntyvät polttoainekustannukset saatiin kuormattuna-ajon kulutuksesta. Junalle polttoaineen kulutus laskettiin bruttotonnikilometriä kohti. Pyöräkuormaajalle polttoaineen kulutus laskettiin käyttötuntia kohti ja hakkurille hakettua irtokuutiota kohti.



Kuvio 4. Hakkurin sekä ranka- ja hakeauton ajonaikainen polttoaineen kulutus (Väkevä ym. 2004: 17 – 18).

Korjaus-, huolto- ja tarvikekustannukset laskettiin tapauksesta riippuen joko kilometriä, käyttötuntia, vuotta tai irtokuutiota kohti. Vuotuiset kustannukset muutettiin simuloinneissa käyttötuntikohtaisiksi. Kuljetusorganisaation kustannukset (hallintokustannukset) ja voittomarginaali laskettiin prosenttiosuutena kokonaiskustannuksista. Väyläkustannukset eli rautatien käytöstä syntyvät ratamaksut laskettiin bruttotonnikilometriä kohti.

Simulointimallissa pyrittiin siihen, että kustannukset muodostuisivat mahdollisimman tarkasti sinä ajankohtana, kun ne todellisuudessaakin syntyisivät. Tällaiseen tilanteeseen ei voida käytännössä täysin päästä. Esimerkiksi polttoaineesta kustannukset muodostuvat jo siinä vaiheessa kuin kone tankataan eikä ajettaessa, kuten tässä tutkimuksessa. Myös esimerkiksi liikennöimismaksut (katsastusmaksut + ajoneuvovero) maksetaan tiettyä ajanhetkenä vuodessa, mutta simuloinnissa tämä huomioidaan tuntia kohti. Sama tilanne on myös huolto-, väylä- ja palkkakustannuksissa. Tämä on puute, joka teoreettisessa simulointimallissa joudutaan hyväksymään.

Taulukossa 2 esitetyt kustannustekijät on kerätty useasta eri lähteestä. Palkkatiedot on saatu Metsäkonealan työehtosopimuksesta (2011), Veturimiestehtävät rautatieliikenteessä työehtosopimuksesta (2012), aiemmasta tutkimuksesta sekä alan toimijoilta kysymällä. Hankintahinnat, arvonalenemisprosentit, pitoajat ja vuotuiset käyttötunnit on arvioitu aiemman tutkimuksen pohjalta (Heikkilä ym. 2005: 19 - 37, Väätäinen ym. 2006: 394 - 395, Ihalainen & Niskanen 2010: 9 - 10, Impola & Tiihonen 2011: 32, Laitila & Väätäinen 2011: 115) ja epäselvissä tapauksissa varmistettu alan toimijoilta. Käyttötuntien osalta haluttiin pitäytyä tilanteessa, jossa sekä auto- että junakaluston vuotuiset käyttötuntimäärät ovat samoja. Tämä nähtiin vertailtavuuden kannalta hyvänä ratkaisuna. Todellisessa tilanteessa junien keskimääräiset käyttötuntimäärät voivat olla jonkin verran autokalustoa korkeammat.

Vakuutus- ja liikennöimismaksut on saatu vakuutus- ja katsastusyhtiöiltä sekä liikenteen turvallisuusvirastosta. Polttoaineen kulutusarvot ja -kustannukset on saatu aiemmasta tutkimuksesta (Väkevä ym. 2004: 17 - 19, Kärhä ym. 2010b: 27, Pajuoja & Kärhä 2011: 22) ja alan toimijoilta. Korjaus-, huolto- ja tarvikekustannukset on arvioitu aiemmasta tutkimuksesta (Väätäinen ym. 2006: 394 - 395, Rinne 2010: 52 - 54, Laitila & Väätäinen 2011: 115) ja kysytty alan toimijoilta. Rautatiekuljetuksista perittävät ratamaksut on saatu Rautateiden verkkoselostuksesta (2011: 49).

3.2 Simulointi

Simulointi on menetelmä, jolla imitoidaan todellisen maailman prosessien ja järjestelmien toimintaa (Banks 1998: 2 – 3). Monien ajassa yhtäaikaisesti tapahtuvien prosessien seurauksena syntyy valtavasti erilaisia skenaarioita ja lopputulemia, joiden ymmärtämiseen ja havainnointiin simulointi soveltuu erityisen hyvin (Harrington & Tumay 2000: 2). Simulointi mahdollistaa ”mitä jos” -kysymysten esittämisen, auttaa järjestelmien suunnittelussa (Banks 1998: 2 – 3) ja eri skenaarioiden järjestyksen sekä kannattavuuden arvioinnissa (Harrington & Tumay 2000: 2). Sekä olemassa olevia että suunnitteluasteella olevia järjestelmiä voidaan mallintaa simuloinnilla (Banks 1998: 2 – 3).

Robinson (2004: 4 – 7) on kuvannut todellisen maailman prosesseja tyypillisesti muuttuviksi, toisiinsa kytkeytyneiksi ja monimutkaisiksi. Prosessien monimutkaisuutta voidaan tarkastella kombinatorisuuden ja dynaamisuuden kautta (Robinson 2004: 5). Kombinatorisuus tarkoittaa systeemin komponenttien määrää ja laajemmin tarkasteltuna myös eri komponenttien toiminnan kaikkia mahdollisia yhdistelmiä. Dynaaminen monimutkaisuus syntyy komponenttien toiminnan liittymisestä toisiinsa. Mitä tiiviimmin toiminnot ovat toisiinsa kytkeytyneitä, sitä suurempaa on dynaaminen monimutkaisuus (Robinson 2004: 5 - 7).

3.2.1 Simulointimallien luokittelu

Yksi toimiva tapa luokitella simulointimalleja on niiden jakaminen kolmen erilouottuvuuden mukaan: staattinen – dynaaminen, jatkuva – epäjatkuva ja deterministinen – stokastinen (Kelton ym. 2002: 9, Rimpiläinen 2007: 26).

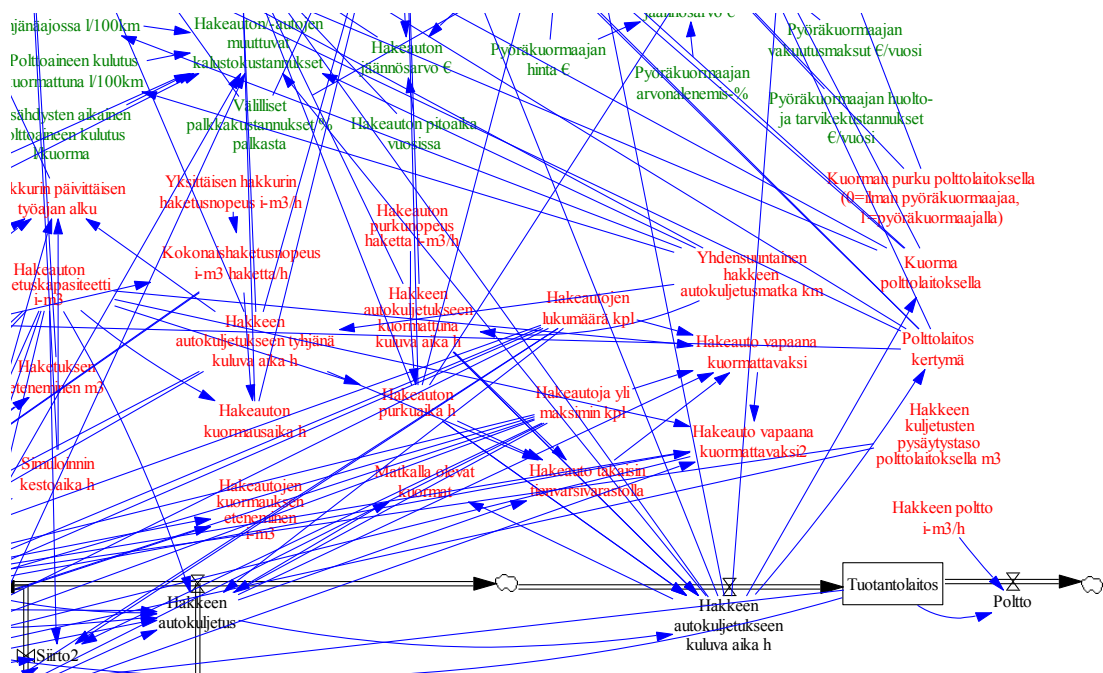
Useimmat matemaattiset mallit ovat staattisia ja kuvaavat systeemiä vain yhtenä määrättynä ajanhetkenä (Banks 1998: 6 – 7). Staattisessa mallissa ajalla ei ole luontaista vaikutusta ja muuttujat pysyvät vakioina koko simuloinnin ajan. Sen sijaan dynaamisessa mallissa muuttujien toiminta ja arvot muuttuvat ajan edetessä (Kelton ym. 2002: 9).

Mikäli mallissa ei ole sattumanvaraisia lähtöarvoja, se on deterministinen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että deterministisen mallin kaikki lähtöarvot voidaan syöttää ennen simuloinnin aloittamista. Stokastisen mallin lähtötilanteessa on sattumanvaraisuutta. Sattumanvaraiset lähtöarvot antavat vaihtelevia tuloksia, joten yksi lyhyt simulointi ei välttämättä anna oikeaa kuvaa todellisuudesta. Tämä tulee huomioida simulointiajojen suunnittelussa (Kelton ym. 2002: 9). Stokastisuudella pyritään tuomaan malliin todellisessa tilanteessa olevaa satunnaista vaihtelua.

Jatkuvassa mallissa muutos on mahdollista jokaisella ajanhetkellä. Diskreetissä mallissa muuttujat pysyvät vakioina aikaintervallien yli ja muuttavat arvoaan ainoastaan tiettyinä määrättyinä hetkinä (Kelton ym. 2002: 9, Banks 1998: 6 – 7). Esimerkiksi nesteen tyhjentyminen säiliöstä on jatkuvaa muutosta, kun taas tavaroiden lähteminen ja saapuminen tuotantoon on diskreettiä (Kelton ym. 2002: 9).

Energiapuun hankintaketjuja on luontevaa simuloida dynaamisella, deterministisellä ja diskreetillä mallilla. Hankintaketjun tapahtumat ovat ehdottomasti aikariippuvaisia, normaalitilanteessa varsin vähän sattumanvaraisuutta sisältäviä ja pääpiirteissään epäjatkuvia.

Tässä tutkimuksessa simulointimallit tehtiin Vensim PLE -ohjelmalla, joka antaa monipuoliset mahdollisuudet mallien muodostamiseen. Kuviossa 5 on esitetty esimerkinomainen osakuva yhdestä tutkimuksesta käytetystä simulointimallista. Alhaalla kuviossa näkyvät mustat nuolet kuvaavat varsinaista hankintaketjua. Ketjun toimintaa ohjataan pääasiassa kuviossa punaisina näkyvillä muuttujilla. Vihreällä näkyvät muuttujat ovat kustannusmuuttujia. Jokaiseen muuttujaan on syötetty tietty kaava tai vakiotekijä, joka omalta osaltaan vaikuttaa mallin antamiin tuloksiin. Muuttujien välillä näkyvät siniset nuolet kuvaavat muuttujien vaikutusta toisiinsa. Kokonainen kuva samasta simulointimallista on esitetty liitteessä 1.



Kuvio 5. Osakuva yhdestä tutkimuksesta käytetystä simulointimallista.

3.2.2 Simuloinnin vahvuudet ja heikkoudet

Simuloinnilla on monia etuja muihin tutkimusmenetelmiin verrattuna. Monimutkaisia tosielämän systeemejä on mahdollista kuvata mallilla, jota voidaan arvioida analyytisesti. Tähän tarkoitukseen simulointi on usein ainoa sopiva tutkimusmenetelmä (Law & Kelton 2000: 91). Simulointi mahdollistaa sekä olemassa että suunnitteilla olevien systeemien arvioinnin erilaisilla toimintaehdoilla (Banks 1998: 10 – 11, Law & Kelton 2000: 92). Tällöin nähdään mikä toimintavaihtoehto parhaiten täyttää tavoitteet ja missä ovat pullonkaulat (Banks 1998: 11, Law & Kelton 2000: 92). Simulointi mahdollistaa myös monia muita menetelmiä paremmin simuloitavaan ilmiöön vaikuttavien satunnaistekijöiden huomioimisen (Law & Kelton 2000: 92, Robinson 2004: 8). Lisäksi simuloimalla kokeiden tekeminen vie huomattavasti vähemmän aikaa kuin oikeassa systeemissä ja on myös useimmiten edullisempaa (Banks 1998: 10, Robinson 2004: 8). Rajoitteita simuloinnissa on yleensä vähemmän kuin monissa muissa menetelmissä ja sen esittämät tulokset ovat selkeitä. Simuloinnilla saadaan esiin uusia ja yllättäviä toimintatapoja, jotka muuten jäisivät havaitsematta (Robinson 2004: 8 – 11).

Simuloinnilla on myös puutteensa. Simulointimallia ei ole mahdollista tehdä täysin todellisuutta vastaavaksi, vaan siinä on tehtävä yksinkertaistuksia (Law & Kelton 2000: 92). Mallit ovat kuitenkin useimmiten riittävän tarkkoja. Liian yksinkertaistetut mallit, kuten myös epätarkat lähtötiedot ja satunnaisvaihtelun huomiotta jättäminen aiheuttavat tuloksiin epätarkkuutta (Law & Kelton 2000: 92). Toisaalta liian monimutkainen malli vaikeuttaa kokonaisuuden hahmottamista ja tekee mallin käytöstä vaikeaa (Banks 1998: 12, Law & Kelton 2000: 92, Robinson 2004: 10 – 11). Rajanveto mallin kattavuuden ja riittävän yksinkertaisuuden välillä korostuu. Menetelmänä simulointi on paljon aikaa vievä ja kallis (Banks 1998: 12, Law & Kelton 2000: 92, Robinson 2004: 10 – 11). Lisäksi simulointimallien tekeminen vaatii paljon lähtödataa ja erityisosaamista. Realistisuuden tunne ja suuri lähtödatan määrä saattavat myös aiheuttaa liian suurta luottamusta mallin antamiin tuloksiin (Robinson 2004: 10 – 11).

3.2.3 Mallien verifiointi ja validointi

Ennen kuin malleja käytetään varsinaisten tulosten simulointiin, ne täytyy verifioida ja validoida. Verifiointi tarkoittaa, että tarkistetaan mallin toimivan siten kuin sen on ajateltu toimivan (Law & Kelton ym. 2000: 264, Robinson 2004: 209). Tämä tarkoittaa siis käytännössä virheiden etsimistä. Validoinnilla taas varmistutaan, että malli vastaa todellisuutta (Law & Kelton ym. 2000: 265). Validoinnissa on kaksi päätekijää: riittävä tarkkuus ja mallin soveltuvuus suunniteltuun käyttötarkoitukseen (Robinson 2004: 210). Mikään malli ei koskaan vastaa 100 % todellisuutta, mutta mallin tulee mahdollistaa todellisen tilanteen ymmärtäminen ja tutkiminen. Riittävä tarkkuus riippuu pitkälti mallin käyttötarkoituksesta (Robinson 2004: 210). Käyttötarkoituksen ja -kohteiden tietäminen onkin välttämätöntä ennen kuin validointia ja verifiointia voidaan tehdä. Validoinnin ja verifiointin tulisi jatkua koko mallin elinkaaren ajan (Robinson 2004: 210 – 212).

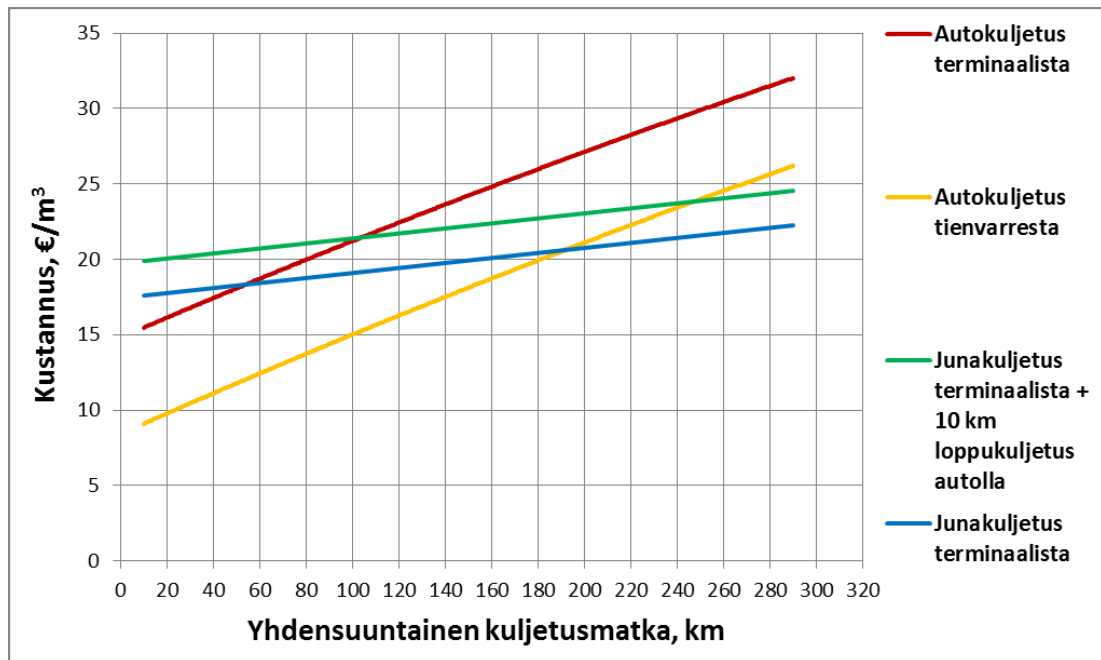
4. TULOKSET JA TARKASTELU

Tulokset on jaettu neljään pääosaan. Ensimmäisenä esitetään perussimulointien tulokset. Nämä ovat tuloksia, joihin muita simulointituloksia verrataan. Toisena tarkastellaan pidempään alkukuljetusmatkaan pohjautuvien simulointien tuloksia. Näiden tulosten avulla voidaan havainnoida kuinka voimakkaasti alkukuljetusmatka vaikuttaa ketjujen kustannuksiin. Kolmanneksi esitetään tulokset, joissa terminaalien kautta kulkee sekä maantie että rautatiekuljetuksia eri prosentiosuuksilla. Tämä mahdollistaa kannattavuuden arvioinnin terminaaleissa, joissa käytetään sekä auto- että rautatiekuljetuksia. Neljännen otsikon alle ovat muokattujen mallien tulokset, joissa terminaalien kustannustekijöitä on muutettu. Tällä on havainnollistettu kuinka voimakkaasti terminaalien kautta kulkevien ketjujen kustannukset laskevat, jos terminaalien perustamis- ja työvoimakustannukset saadaan painettua alas.

Kaikkien neljän otsikon alle esitetään kolme perusteiltaan samanlaista kuvaajaa. Kahdessa ensimmäisessä kuvaajassa hankintaketjujen kokonaiskustannuksia tarkastellaan kuljetusmatkaan verrattuna. Toisessa kuvaajassa käytetään volyymia 5000 m³ ja toisessa 15000 m³. Kolmannessa kuvaajassa kokonaiskustannuksia verrataan kuljetusvolyymeihin kuljetusetäisyyksillä 10 km ja 290 km.

4.1 Perussimuloinnit

Kuviossa 6 on esitetty kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 5000 m³/kk alkukuljetusmatkan terminaalien ollessa 10 km. Alkuljetusmatka lasketaan kuviossa esitetyn kuljetusmatkan päälle. Myös junakuljetuksen loppukuljetuksena tehtävä autokuljetus lasketaan esitetyn kuljetusmatkan päälle. Tämä periaate on kaikissa tuloksissa esitetyissä kuvioissa. Kuvioista havaitaan, että junakuljetus terminaalista muuttuu tienvarsihaketukseen ja suoraan autokuljetukseen perustuvaa hankintaketjua kannattavammaksi noin 190 km kohdalla. Verrattaessa suoraa autokuljetusta junakuljetukseen, jossa loppukuljetus (10 km) hoidetaan autolla, on kannattavuusraja noin 250 km. Autokuljetus terminaalista ei muutu missään vaiheessa suoraa autokuljetusta kannattavammaksi.



Kuvio 6. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 5000 m³/kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

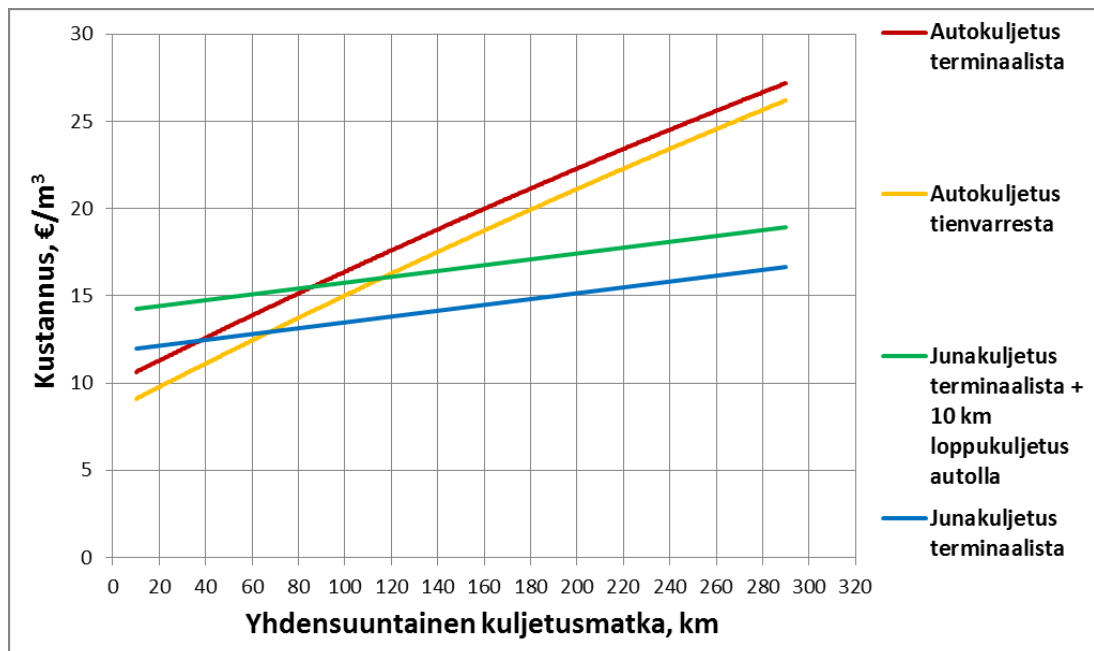
Junakuljetuksissa ei näin ollen vielä volyymilla 5000 m³/kk päästä aiemmissa tutkimuksissa (Enström 2009: 4, Pihlajamäki & Salo 2010: 41, Tahvanainen & Anttila 2011) havaittuun 150 km kannattavuusrajaan. Verrattuna Laitilan ja Väätäisen (2011: 121) saamiin tuloksiin autokuljetus terminaalista -kuvaaja on kulmakertoimeltaan jonkin verran jyrkempi eli kuljetusetäisyys vaikuttaa kustannuksiin voimakkaammin. Tähän suurin vaikuttava tekijä on todennäköisesti tässä tutkimuksessa käytetty korkeampi polttoaineen hinta ja mahdollisesti myös huolto- ja ylläpitokustannukset on tässä tutkimuksessa arvioitu korkeammiksi. Tätä ei voi täysin aukottomasti todeta, koska laskentaperusteet ovat erilaiset. Lyhyillä etäisyyksillä kustannukset ovat lähellä toisiaan, kun Laitilan ja Väätäisen (2011) tuloksista vähennetään korjuun ja metsäkuljetuksen kustannukset. Suuremmilla etäisyyksillä kustannuksissa tulee heittoa useita euroja.

Tahvanaisen ja Anttilan (2011: 3368) tutkimuksessa junakuljetukset eivät kokopuulla reagoi yhtä voimakkaasti kuljetusetäisyyden kasvuun kuin rangalla tässä tutkimuksessa. Tätäkin selittänee tässä tutkimuksessa käytetyt korkeammat polttoaine- ja huoltokustannukset. Kustannusten taso on tässä tutkimuksessa jo lyhyillä etäisyyksillä (50 km) korkeampi kuin Tahvanaisen ja Anttilan

tutkimuksessa. Tämä johtunee siitä, että kuviossa käytetty volyyymi on pienempi kuin vertailututkimuksessa.

Terminaaliketjuista autokuljetus on kannattavinta 55 km asti, jonka jälkeen junakuljetus muuttuu kannattavammaksi. Jos junakuljetukseen joudutaan liittämään loppukuljetus autolla, on kannattavuusraja 100 km. Autokuljetusten kuvaajien junakuljetusten kuvaajia suuremmat kulmakertoimet osoittavat selvästi autokuljetusten kustannusten voimakkaamman riippuvuuden kuljetusetäisyydestä.

Kuviossa 7 tarkasteltava tilanne on muutoin sama kuin kuviossa 5, mutta nyt kuukaudessa terminaalini läpi kulkee 15000 m³ energiapuuta. Havaitaan, että yksikkökustannukset kiintokuutiota kohti laskevat merkittävästi. Keskimäärin tämä lasku on 5 €/m³ luokkaa. Junakuljetus terminaalista on suoraa autokuljetusta kannattavampaa jo noin 70 km kohdalla ja junakuljetus, jossa loppukuljetuksena on 10 km autokuljetusta, on suoraa autokuljetusta kannattavampaa noin 110 km kohdalla.



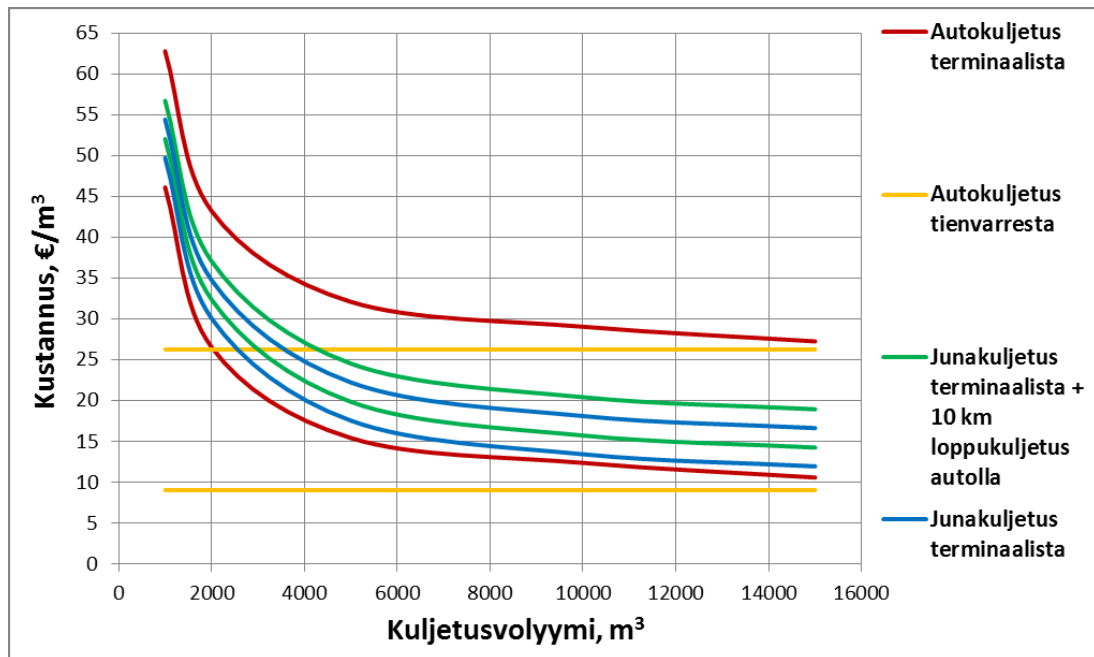
Kuvio 7. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 15000 m³/kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliniin (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

Autokuljetus terminaalista ei edelleenkään pysty kilpailemaan millään tutkituilla etäisyyksillä suoran autokuljetuksen kanssa. Tämä tulos poikkeaa Impolan ja Tiihosen (2011: 36) esittämästä 100 km etäisyydestä, jolla terminaalien kautta kulkevien autokuljetusketjujen pitäisi muuttua suoraa autokuljetusta kannattavammaksi. Yksiselitteistä syytä tähän on vaikea antaa. Todennäköisimmin merkittävimmät tekijät löytyvät tämän tutkimuksen rajoitteista (esim. toimitusvarmuus, odotusajat, tienvarsihaketuksen lisäkustannukset). Terminaaliketjuista autokuljetus säilyy kannattavimpana noin 35 km asti, jonka jälkeen junakuljetuksen kustannukset jäävät pienemmiksi. Jos junakuljetukseen liitetään loppukuljetus autolla, on kannattavuusraja noin 85 km.

Aiempiin metsäenergian hankintaketjujen kustannuksia selvittäneisiin tutkimuksiin verrattuna (Enström 2009: 4, Pihlajamäki & Salo 2010: 41, Tahvanainen & Anttila 2011) on rautatiekuljetusten kannattavuusraja tässä tutkimuksessa volyymilla 15000 m³/kk ja suoralla junakuljetuksella selkeästi alemmalla tasolla. Tähän vaikuttanee osaltaan tutkimuksen lähestymistapa, jossa hallintokustannukset ja voittomarginaali on vakioitu. Todellisia kuljetustaksoja tarkastellen hallinnon ja varsinkin voittomarginaalin osuus olisi rautatiekuljetuksissa todennäköisesti suurempi. Toisaalta Iikkanen ja Siren (2005) ovat omassa selvityksessään esittäneet, että rautatiekuljetukset voisivat olla maantiekuljetuksia kannattavampia jopa alle 50 matkalla, kun päästään hyödyntämään suoria kuljetusyhteyksiä ja vahvoja tavaravirtoja. Kyseinen selvitys tarkasteli rautatiekuljetuksia yleisellä tasolla, eikä kyseessä ollut varsinainen metsäenergian kuljetuksia koskeva selvitys. Tämän tutkimuksen perusteella vaikuttaisi, että metsäenergian kuljetuksissakin voitaisiin suorilla yhteyksillä ja suurilla volyymeilla päästä lähelle näitä kannattavuusrajoja.

Kuviossa 8 on vertailtu kuljetusvolyymien vaikutusta eri hankintaketjujen kustannuksiin. Jokaiselle hankintaketjulle on esitetty tulokset sekä 10 km että 290 km etäisyyksillä. Kuviosta nähdään hyvin kuinka volyymin kasvu laskee aluksi yksikkökustannuksia hyvin voimakkaasti, mutta tämä vaikutus tasoittuu volyymien kasvaessa. Kuljetusmatkalla 10 km mikään terminaaliketju ei pysty kilpailemaan suoran autokuljetuksen kanssa. Kuljetusmatkalla 290 km junakuljetukset muuttavat suoraa autokuljetusta kannattavammaksi noin 3500 m³/kk (suora junakuljetus) ja noin 4000 m³/kk (loppukuljetus autolla) volyymeilla.

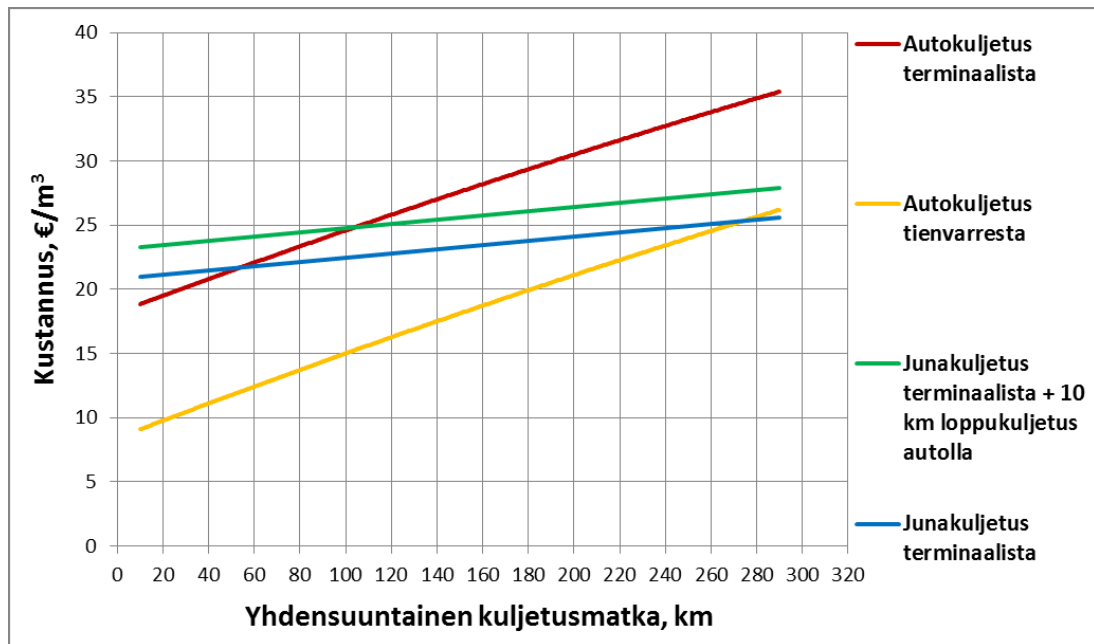
Esimerkiksi autokuljetuksella terminaalista volyymin muutos tasolta 1000 m³/kk tasolle 15000 m³/kk laskee 290 km kuljetusetäisyydellä yksikkökustannuksia tasolta 63 €/m³ tasolle 27 €/m³ (muutos 36 €). Lyhyemmällä 10 km kuljetusetäisyydellä vastaava volyymin muutos aiheuttaa kustannusten alenemisen tasolta 46 €/m³ tasolle 11 €/m³ (muutos 35 €). Muutos on molemmilla kuljetusetäisyyksillä merkittävä.



Kuvio 8. Kuljetusvolyymien vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin yhdensuuntaisilla kuljetusmatkoilla 10 km ja 290 km alkukuljetusmatkan terminaaliin ollessa 10 km (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

4.2 Pidempään alkukuljetusmatkaan pohjautuvat simuloinnit

Kuvioita 6 ja 9 vertaamalla voidaan arvioida alkukuljetusmatkan vaikutusta terminaalihankintaketjujen kannattavuuteen. Ketjut ovat kuviossa 9 muilta osin samanlaisia kuin kuviossa 6 (volyymi 5000 m³, alkukuljetusmatka 10 km), mutta alkukuljetusmatka on nostettu 10 km:stä 50 km:iin. Tämän seurauksena ketjujen yksikkökustannukset nousevat keskimäärin noin 3,5 €/m³. Suoralle autokuljetukselle ei näillä ehdoilla pärjää kuin junakuljetus terminaalista, jos kuljetusmatka nousee yli 270 km. Verrattuna kuvioon 6 junakuljetuksen on oltava 80 km pidempi kannattaakseen. Terminaaliketjujen väliset kannattavuusrajat säilyvät luonnollisesti samoina kuin perussimuloinneissa.



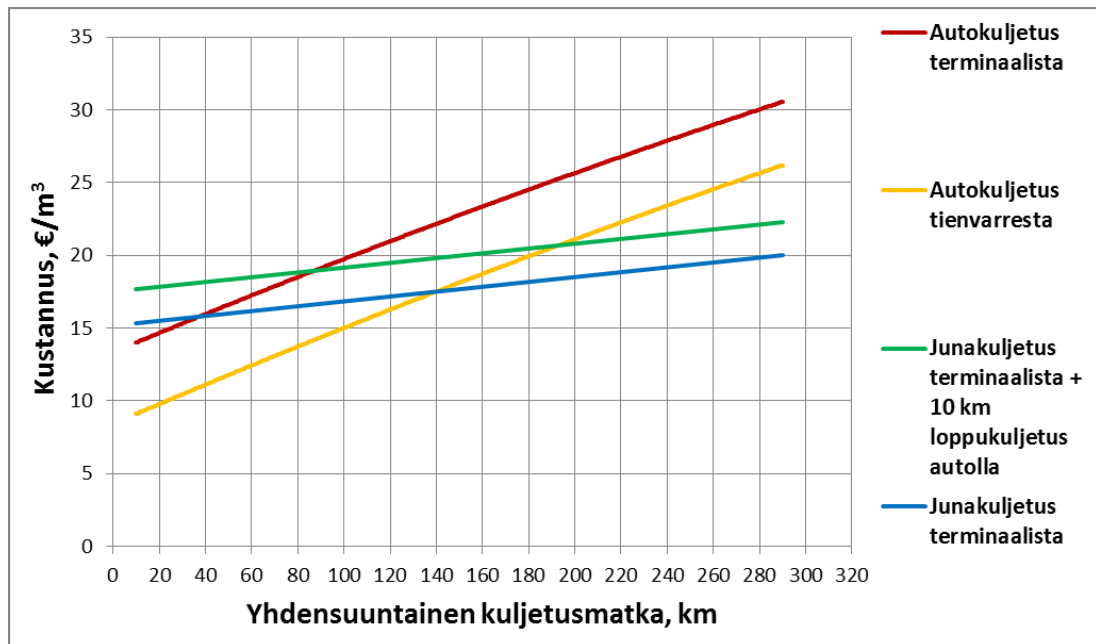
Kuvio 9. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 5000 m³/kk ja 50 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

Volyymin nostaminen parantaa terminaalin kannattavuutta myös pidemmällä alkukuljetusmatkalla. Kuviot 7 ja 10 ovat samalla tavalla vertailukelpoiset kuin edellä esitetyt kuviot 6 ja 9. Kuvioissa 7 ja 10 volyymi on vain korkeampi (15000 m³). Volyymin nosto tekee pidemmällä alkukuljetusmatkalla junakuljetuksesta suoraa autokuljetusta kannattavampaa 140 km etäisyydellä. Junakuljetus, johon yhdistetään loppukuljetus autolla, on suoraa autokuljetusta kannattavampaa 190 km etäisyydellä. Volyymilla 15000 m³/kk ja pidemmällä alkukuljetusmatkalla ollaan näin ollen lähellä aiemmissa tutkimuksissa havaittua 150 km kannattavuusrajaa.

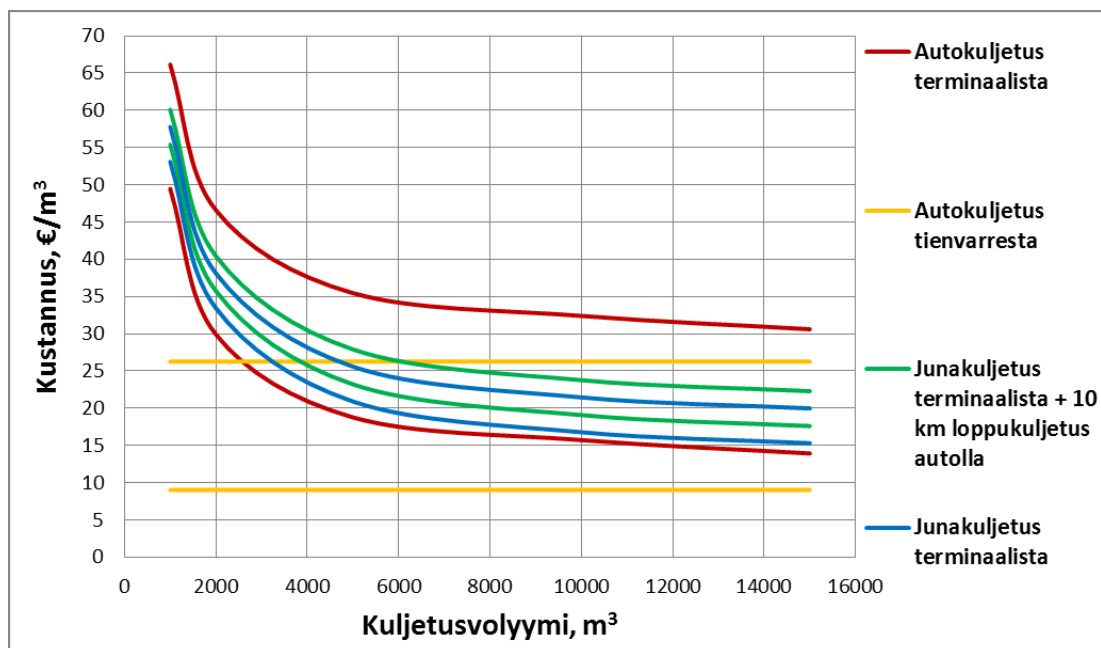
Yksikkökustannusten ero volyymien 5000 m³/kk ja 15000 m³/kk välillä on 50 km alkukuljetusmatkalla keskimäärin noin 5 €/m³ luokkaa eli samalla tasolla kuin lyhyemmälläkin alkukuljetusmatkalla. Terminaaliketjujen väliset kannattavuusrajat ovat samat kuin perussimuloinneissa.

Kuvioita 8 ja 11 vertaamalla havaitaan, että alkukuljetusmatkan nostaminen 10 km:stä 50 km:iin nostaa junakuljetusketjuilta vaadittavaa volyymia kilpailussa suoraa autokuljetusta vastaan 1000 - 2000 m³/kk. Terminaalin kautta on kuljetettava 290 km kuljetusmatkalla energiapuuta näin ollen vähintään 4500 m³/kk (suora junakuljetus)

tai 6000 m³/kk (loppukuljetus autolla). Kuljetusmatkalla 10 km terminaaliketjut eivät pärjää suoraa autokuljetusta vastaan millään volyymilla.



Kuvio 10. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin volyymilla 15000 m³/kk ja 50 km alkukuljetusmatkalla terminaaliiin (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

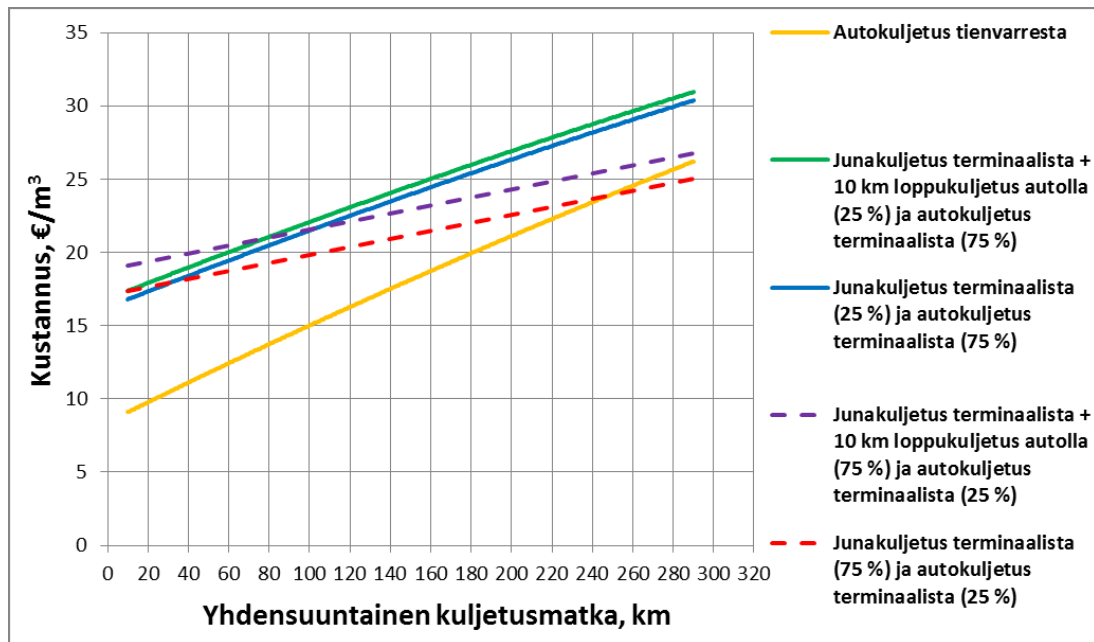


Kuvio 11. Kuljetusvolyymin vaikutus hankintaketjujen kustannuksiin yhdensuuntaisilla kuljetusmatkoilla 10 km ja 290 km alkukuljetusmatkan terminaaliiin ollessa 50 km (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

4.3 Rauta- ja maantiekuljetuksia hyödyntävien terminaalien simuloinnit

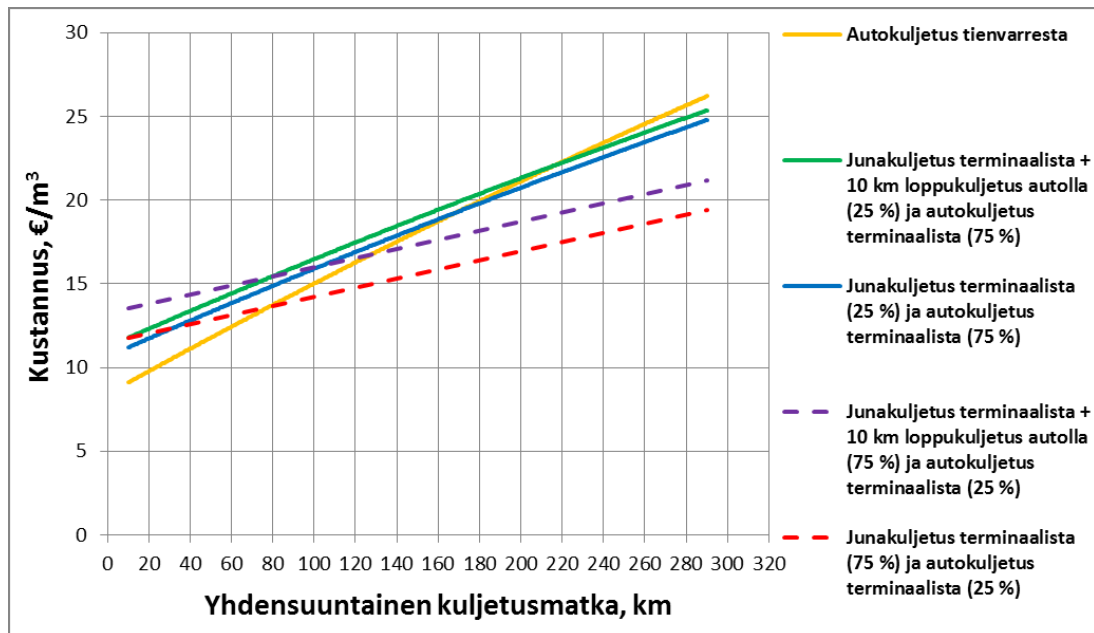
Tässä luvussa on havainnollistettu kuinka terminaalitoiminnan kannattavuuteen vaikuttaa, kun terminaalien kautta kulkee sekä maantie- että rautatiekuljetuksiin pohjautuvia hankintaketjuja. Kuvioissa on esitetty erilaisia yhdistelmiä terminaalien kautta kulkevista hankintaketjuista ja verrattu näitä suoraan autokuljetukseen tienvaresta. Kuvioissa esitetyt prosentiosuudet perustuvat kuljetettuihin kiintokuutioihin. Ketjuyhdistelmät havainnollistavat minkälaisia osuuksia eri kuljetusmuodoilla tulisi terminaalissa olla, jotta toiminta olisi kannattavaa. Vertailu soveltuu erityisesti tilanteisiin, joissa rautatiekuljetukset ovat autokuljetuksia edullisempia, mutta niitä voidaan käyttää vain osalle käyttökohteista ja loput on pakko hoitaa kalliimpina autokuljetuksina. Kuljetusetäisyyksillä ja -volyymeilla, joilla terminaalista lähtevä autokuljetus on rautatiekuljetusta edullisempi, ei molempien kuljetusmuotojen käyttäminen tässä esitetyllä tavalla ole yleensä järkevää.

Kuviossa 12 kuljetettava volyymi on $5000 \text{ m}^3/\text{kk}$ ja alkukuljetusmatka 10 km. Tällöin ainoastaan ketjujen yhdistelmä, jossa 75 % kuljetetaan terminaalista junakuljetuksella käyttökohteelle ja 25 % terminaalista autokuljetuksella käyttökohteelle pystyy kilpailemaan suoran autokuljetuksen kanssa. Tähän vaaditaan 250 km kuljetusetäisyys. Kannattavuuteen vaadittava etäisyys on sama kuin perussimulointien kuvion 6 ($5000 \text{ m}^3/\text{kk}$, alkukuljetusmatka 10 km) junakuljetuksella, johon on yhdistetty loppukuljetus autolla.

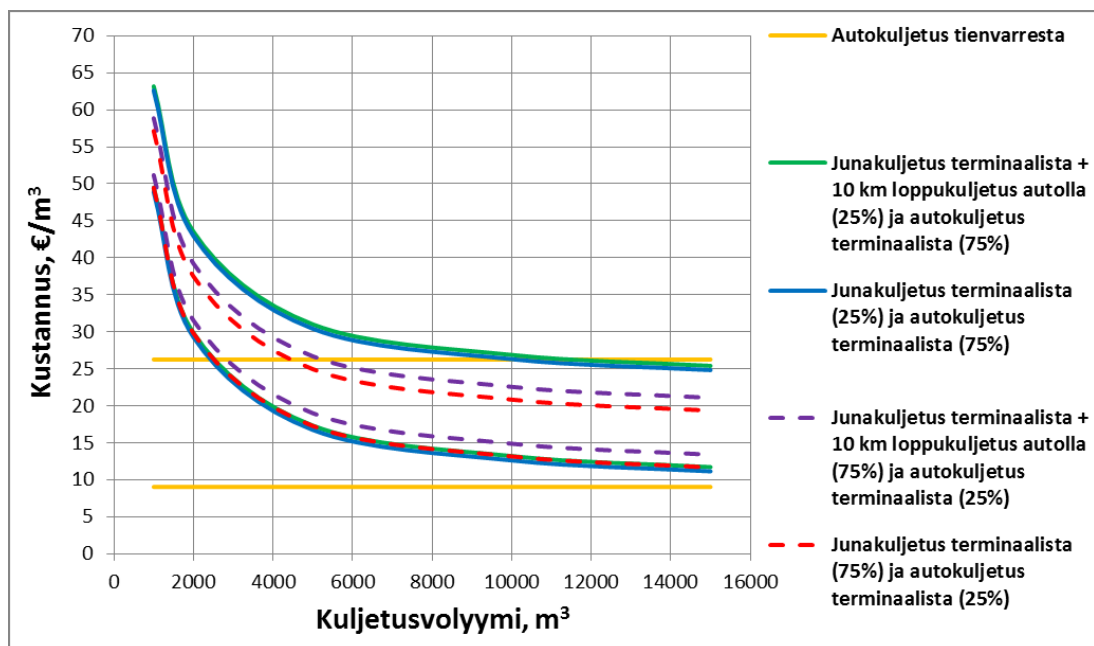


Kuvio 12. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjuyhdistelmien kustannuksiin volyymilla 5000 m³/kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

Kuviossa 13 volyymi on nostettu tasolle 15000 m³/kk muiden tekijöiden pysyessä samana kuin kuviossa 12. Yksikkökustannukset laskevat keskimäärin noin 6 €/m³. Nyt kaikki testatut hankintaketjujen yhdistelmät pystyvät alittamaan suoran autokuljetuksen kustannukset. Ketjuyhdistelmissä, joissa junakuljetuksen osuus on 75 %, kustannukset alittavat suoran autokuljetuksen kustannukset 80 km (suora junakuljetus) ja 125 km (loppukuljetus autolla) kohdalla. Ketjuyhdistelmissä, joissa junakuljetusten osuus on 25 %, tämä tapahtuu 170 km ja 195 km kohdalla.



Kuvio 13. Kuljetusmatkan vaikutus hankintaketjuyhdistelmien kustannuksiin volyymilla 15000 m³/kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliiin (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).



Kuvio 14. Kuljetusvolyymin vaikutus hankintaketjuyhdistelmien kustannuksiin kuljetusmatkoilla 10 km ja 290 km alkukuljetusmatkan terminaaliiin ollessa 10 km (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

Hankintaketjuyhdistelmien kuljetusvolyymien vaikutus kustannuksiin on esitetty kuviossa 14. Kuljetusetäisyydellä 290 km 75 % junakuljetuksia sisältävät hankintaketjuyhdistelmät vaativat kannattaakseen volyymia 4500 m³/kk (suora junakuljetus) ja 5500 m³/kk (loppukuljetus autolla), kun niitä verrataan suoraan autokuljetukseen. Pienemmällä 25 % junakuljetusosuudella kuljetusvolyymia täytyy olla 10500 m³/kk ja 11500 m³/kk.

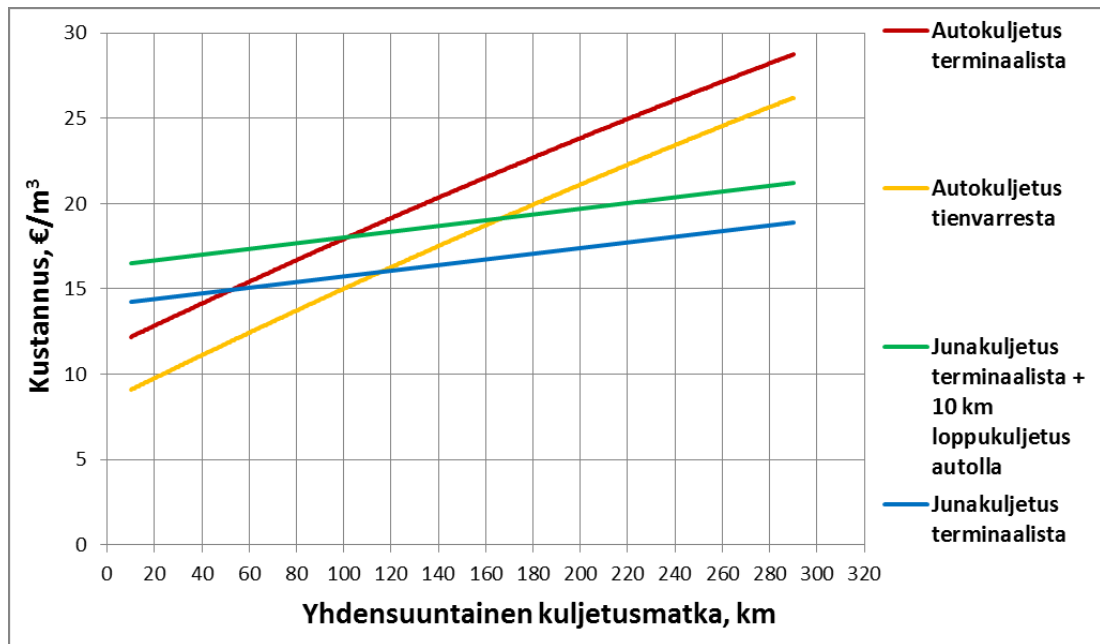
4.4 Muokattuihin terminaalin kustannustekijöihin pohjautuvat simuloinnit

Muokattuihin terminaalin kustannustekijöihin pohjautuvissa simuloinneissa on muutettu terminaalin kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä terminaalin perustamiskustannusten (€/m²), terminaalin pinta-alan (ha) ja työaikojen (h/kk) suhteen. Näissä muokatuissa malleissa terminaalin perustamiskustannukset on laskettu 100 €/m² tasolta tasolle 50 €/m² ja terminaalin pinta-ala 5 ha:sta 3 ha:iin. Lisäksi työajat on minimoitu siten, että työpäivät viikossa ja työtunnit päivässä on laskettu alimmalle mahdolliselle tasolle, jolla tarkasteltavana oleva volyymi saadaan kuukauden aikana kuljetettua hankintaketjun läpi. Myös hakkurityöntekijän ja pyöräkuormaajankuljettajan työn aloitusaikoja on tarvittaessa muokattu eriäviksi.

Kuviossa 15 on esitetty tulokset muokatuilla kustannustekijöillä 5000 m³/kk volyymilla ja 10 km alkukuljetusmatkalla. Terminaaliketjut muuttuvat suoraa autokuljetusta kannattavammaksi nyt 115 km kohdalla, jolloin junakuljetus terminaalista muuttuu kannattavammaksi. Junakuljetus, johon on yhdistetty loppukuljetus autolla, on suoraa autokuljetusta kannattavampaa 165 km jälkeen.

Verrattuna kuvioon 6, jossa simuloinnit on tehty muokkaamattomilla kustannustekijöillä, terminaaliketjujen kannattavuus paranee selkeästi. Junakuljetusketjun kannattavuusraja verrattuna suoraan autokuljetukseen laskee 75 km:llä. Junakuljetuksen, jossa loppukuljetus tehdään autolla, kannattavuusraja laskee 85 km:llä. Euromääräisesti kustannukset laskevat keskimäärin noin 3 €/m³.

Terminaaliketjujen keskinäinen kilpailukyky säilyy samana kuin kuviossa 6 eli junakuljetus terminaalista on kannattavampaa 55 km ja 100 km jälkeen.

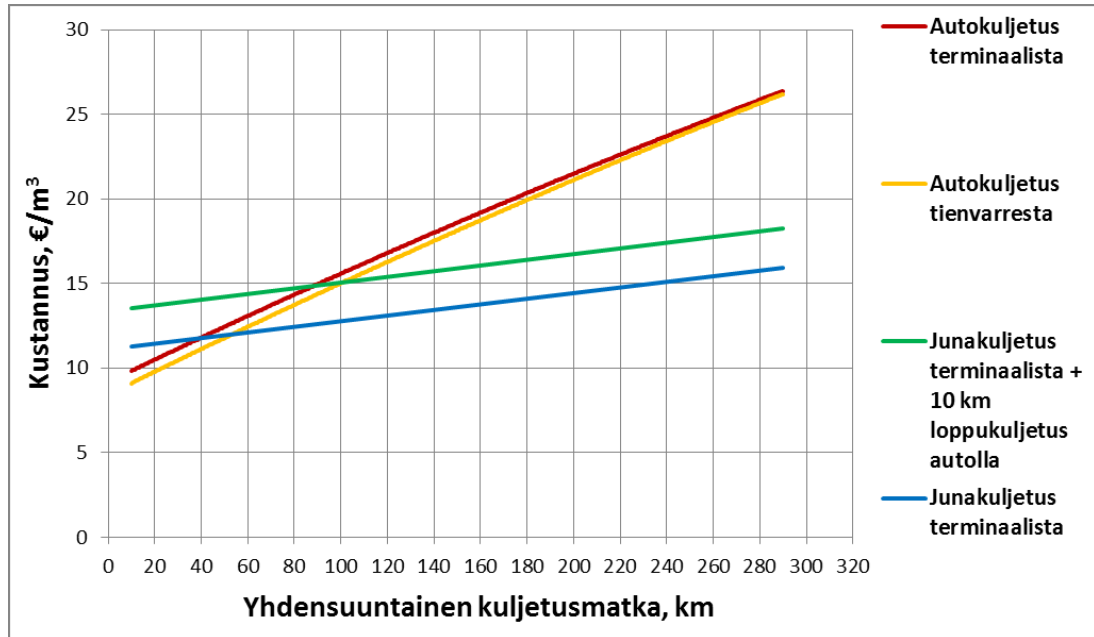


Kuvio 15. Kuljetusmatkan vaikutus kustannuksiin hankintaketjuissa, joissa terminaalin kustannustekijöitä (terminaalin pinta-ala ha, terminaalin perustamiskustannus €/m³, työajat h) on muokattu, volyymilla 5000 m³/kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

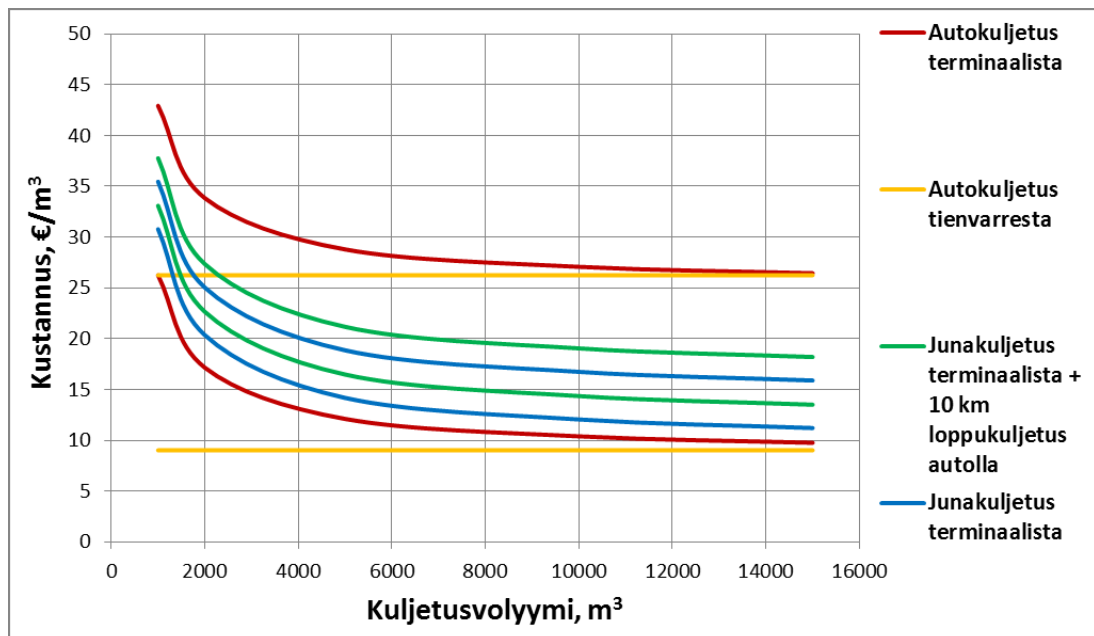
Volyymin noustessa tasolle 15000 m³/kk junakuljetus terminaalista muuttuu suoraan autokuljetusta kannattavammaksi vaihtoehdoksi 55 km kohdalla ja junakuljetus autoloppukuljetuksella 100 km kohdalla (kuvio 16). Nyt ollaan jo hyvin lähellä Iikkasen ja Sirenin (2005) esittämää 50 km kannattavuusrajaa, jolla rautatiekuljetukset voisivat olla hyvissä olosuhteissa autokuljetuksia kannattavampia. Ensimmäistä kertaa myös autokuljetus terminaalista on lähes yhtä kannattava ratkaisu kuin suora autokuljetus tienvarresta. Tähän tosin vaaditaan kuljetusetäisyyttä liki 300 km.

Terminaaliketjujen keskinäiset kannattavuusrajat kulkevat 40 km ja 90 km kohdalla, joissa junakuljetus ja junakuljetus yhdistettynä loppukuljetukseen autolla alittavat suoran autokuljetuksen kustannukset.

Verrattuna kuvioon 7, jossa simuloinnit on tehty muokkaamattomilla kustannustekijöillä, junakuljetusten kannattavuusrajat verrattuna suoraan autokuljetukseen laskevat 30 km:llä ja 20 km:llä. Euromääräisesti lasku on samaa tasoa kuin volyymilla 5000 m³/kk eli 3 €/m³.



Kuvio 16. Kuljetusmatkan vaikutus kustannuksiin hankintaketjuissa, joissa terminaalin kustannustekijöitä (terminaalin pinta-ala ha, terminaalin perustamiskustannus €/m³, työajat h) on muokattu, volyymilla 15000 m³/kk ja 10 km alkukuljetusmatkalla terminaaliin (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).



Kuvio 17. Kuljetusvolyymien vaikutus kustannuksiin hankintaketjuissa, joissa terminaalin kustannustekijöitä (terminaalin pinta-ala ha, terminaalin perustamiskustannus €/m³, työajat h) on muokattu, kuljetusmatkoilla 10 km ja 290 km alkukuljetusmatkan terminaaliin ollessa 10 km (alku- ja loppukuljetusmatka lasketaan yhdensuuntaisen kuljetusmatkan päälle).

Kun terminaalin kustannustekijöitä saadaan hiottua alaspäin, volyymin merkitys kannattavuuteen vähenee. Tämä havaitaan selvästi kuviosta 17. Suurilla volyyymeilla ero esim. kuvion 8 kustannuksiin on hyvin pieni, sen sijaan pienillä volyyymeilla merkitys on jopa 20 €/m^3 luokkaa. Autokuljetuksella terminaalista volyymin muutos tasolta $1000 \text{ m}^3/\text{kk}$ tasolle $15000 \text{ m}^3/\text{kk}$ laskee kuljetusetäisyydellä 290 km yksikkökustannuksia tasolta 48 €/m^3 tasolle 27 €/m^3 (muutos 21 €). Vastaavasti kuljetusetäisyydellä 10 km kustannukset laskevat tasolta 27 €/m^3 tasolle 10 €/m^3 (muutos 17 €). Volyymien muutoksella on näin ollen selvästi pienempi vaikutus yksikkökustannuksiin kuin perussimuloinneissa. Muutos on kuitenkin edelleen merkittävä.

Kuljetusetäisyydellä 290 km junakuljetukset terminaalista muuttuvat suoraa autokuljetusta kannattavammaksi hieman volyymin $2000 \text{ m}^3/\text{kk}$ molemmiin puolin. Tämä tarkoittaa noin $1500 \text{ m}^3/\text{kk}$ ja $2000 \text{ m}^3/\text{kk}$ eroa perussimulointien volyymitarkastelun (kuvio 8) tuloksiin verrattuna.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää yhtäaikaaisesti kuljetusetäisyyksien ja -volyymien vaikutusta bioenergian hankintaketjujen kannattavuuteen. Tähän pyrittiin tekemällä vertailua bioenergiaterminaalin kautta kulkevien hankintaketjujen ja suoraan autokuljetukseen ja tienvarsihaketukseen perustuvan hankintaketjun välillä. Ketjun osista ainoastaan terminaalitoiminta oli omassa hallussa ja muut ketjun osat ostettiin alihankkijoilta. Tästä johtuen volyyymi vaikutti energiapuun yksikkökustannuksiin ainoastaan terminaalissa.

Tutkimuksella tavoiteltiin myös uutta tietoa maantie- ja rautatiekuljetusten välisestä kannattavuudesta eri kuljetusetäisyyksillä. Tämä nähtiin tarpeelliseksi, koska rautateiden tavarankuljetuksen kilpailun vapautuminen vuonna 2007 ja uusien toimijoiden mahdollinen tulo alalle saattaa parantaa rautateiden kilpailukykyä verrattuna maantiekuljetuksiin. Tutkimuksessa käytettiin hieman tavanomaisesta poikkeavaa lähestymistapaa ketjujen kustannustarkastelussa. Sekä hankintaketjujen hallintokustannusosuus että voittomarginaali oli kaikissa tarkasteluissa vakioitu samaan prosenttiosuuteen kokonaiskustannuksista. Tällä tavalla oli paremmin mahdollista arvioida, millä etäisyyksillä maantie- ja rautatiekuljetukset tosiasiansa voisivat olla kannattavia.

5.1 Tutkimustulokset ja niiden merkitys aiempaan tutkimukseen verrattuna

Vakioiduilla hallintokustannuksilla ja voittomarginaalilla tehdyt laskelmat antoivat osin aiemmasta tutkimuksesta poikkeavia tuloksia rautatie- ja maantiekuljetusten välisessä kannattavuusvertailussa. Aiemmissa metsäenergian hankintaketjujen kannattavuutta selvittäneissä tutkimuksissa rautatiekuljetusten on esitetty olevan maantiekuljetuksia kannattavampia keskimäärin 150 km ylittävillä kuljetusetäisyyksillä. Verrattaessa suoraa autokuljetusta ja terminaalista suoraan käyttökohteelle etenevää rautatiekuljetusta toisiinsa, oli rautatiekuljetus tässä tutkimuksessa kannattavampi vaihtoehto alimmillaan jopa 55 km kuljetusetäisyydellä. Tälle tasolla pääsemiseen tarvittiin kuitenkin terminaalin perustamiskustannusten, terminaalin pinta-alan ja työaikojen hiomista alemmas (muokatut mallit). Yleisellä tasolla rautatiekuljetusten kilpailukykyä selvittäneessä

aiemmassa tutkimuksessa on esitetty, että jopa alle 50 km etäisyydetkin olisivat mahdollisia, mikäli volyymit ovat riittävän korkeita ja voidaan hyödyntää suoria yhteyksiä. Tämä tutkimus puoltaa tätä näkemystä.

Perussimuloinneissa terminaalien kautta kulkeva rautatiekuljetusketju oli suoraa autokuljetusta kannattavampi lyhimmillään 70 km etäisyyden jälkeen. Tämäkin tulos on alle puolet aiemmissa tutkimuksissa esitetystä 150 km kannattavuusrajasta. Tulee kuitenkin huomioida, että tässä tutkimuksessa saadut alimmat rautatiekuljetusten kannattavuusrajat (muokatut mallit: 55 km ja perussimuloinnit: 70 km) on saavutettu suurella volyyymilla (15000 m³/kk), verrattain lyhyellä 10 km alkukuljetusmatkalla ja suoralla kuljetuksella terminaalista käyttökohteelle. Volyymilla 15000 m³/kk, mutta 50 km alkukuljetusmatkalla ja purkuterminalin kautta kulkevalla ketjulla kannattavuusraja nousee muokkaamattomilla kustannuksilla 190 km:iin, joka ylittää jo selvästi aiemmassa tutkimuksessa esitetyn 150 km kannattavuusrajan. Jos volyyymi lasketaan tasolle 5000 m³/kk ja alkukuljetusmatka pidetään 50 km:ssä, ei suoralle autokuljetukselle pärjää kuin suora junakuljetus käyttökohteelle. Tähän vaaditaan kuljetusetäisyyttä 270 km.

Junakuljetuksissa olisi potentiaalia selvästi nykykilpailutilannetta lyhyemmilläkin etäisyyksillä. Kriittisiä tekijöitä kilpailukyvyn kannalta ovat volyyymi, alkukuljetusmatka sekä kuormausten ja purkujen määrä. On mahdollista ja jopa todennäköistä, että rautatiekuljetuksissa voittomarginaali ja hallintokustannusosuus ovat korkeampia kuin autokuljetuksissa. Tästä seuraa, että rautatiekuljetusten käytännön kilpailukyky ei ole aivan samalla tasolla tämän tutkimuksen tulosten kanssa. Kilpailutilanteesta johtuen tämä näkyy todennäköisesti eniten juuri lyhyillä kuljetusetäisyyksillä, koska kilpailu pelkäästään autokuljetuksia vastaan antaa mahdollisuuden keskittyä vain parhaiten kannattaviin kuljetuksiin ja pitää niissä hinnat juuri autokuljetuksen hintojen alapuolella.

Rautateiden tavarankuljetusten kilpailun vapautuminen ajaa käytännön kilpailutilannetta lähemmäs tämän tutkimuksen tuloksia. Tähän menee kuitenkin aikaa, koska uuden yrityksen toiminnan kehittyminen ja laajentuminen on rautateillä pääomaintensiivisyydestä johtuen hidasta. Paikallisesti tällä voi kuitenkin olla vaikutusta suhteellisen lyhyelläkin aikavälillä. Tulokset kertovat hyvin

kuljetusmuotojen välisestä kilpailukykypotentialista ja myös käytännön kilpailukyvystä, kun huomioidaan rautatiekuljetusten kustannusten lievä aliarvio lyhyillä kuljetusetäisyyksillä. Tulokset ovat linjassa aiemman tutkimustiedon kanssa.

Tutkimuksessa tehtiin vertailua volyymin vaikutuksesta ketjujen kannattavuuteen. Tällaista vertailua ei ole aiemmin paljon tehty, vaan yleensä selvitykset on tehty case-tyyppisellä lähestymistavalla yhdellä volyymilla. Käyttöasteisiin pohjautuvaa kustannuslaskentaa on kyllä hyödynnetty, mutta nämäkin on yleensä tehty tietylle koneelle, eikä hankintaketjun osalle kuten tässä tutkimuksessa.

Volyymien vaikutus ketjujen kustannuksiin toimi odotetulla tavalla eli pienillä volyymeilla vaikutus on suurempi ja volyymin kasvaessa vaikutus koko ajan vähenee. Muokatuissa malleissa sekä euromääräinen että suhteellinen kustannusten lasku on loogisesti pienempi kuin perussimuloinneissa, koska niiden lähtökustannustasokin on pienempi. Muokatuissa malleissa suuremmalla etäisyydellä volyymin kasvu pienentää yksikkökustannuksia absoluuttisesti enemmän kuin vastaava volyymin muutos pienemmällä etäisyydellä. Perussimuloinneissa vastaavaa ilmiötä ei ole havaittavissa tai ainakin se on selvästi vähäisempää. Tämän selittää muokatuissa malleissa tehty työtuntien alentaminen mahdollisimman pieneksi kyseiselle volyymille ja kuljetusetäisyydelle. Suuremmalla kuljetusetäisyydellä terminaalien työajat venyvät pidemmiksi ja sitä kautta palkkakustannukset nousevat korkeammiksi, jolloin volyymin muutos vaikuttaa yksikkökustannuksiin voimakkaammin. Perussimuloinneissa työtunnit ovat kaikilla etäisyyksillä ja volyymeilla samat.

Autokuljetukset terminaalista ovat kaikilla tarkastelluilla volyymeilla ja kuljetusetäisyyksillä kalliimpia kuin suora autokuljetus tienvarresta. Tosin muokatuissa malleissa volyymilla 15000 m³/kk kustannustasot ovat jo hyvin lähellä toisiaan. Tämä tulos on odotettu, koska terminaaliketjuissa kustannuksia aiheuttavia purkuja ja kuormauksia tulee väistämättä suoraa autokuljetusta enemmän. Lisäksi pienillä volyymeilla terminaaliketjut kärsivät suhteessa suuremmista pääoma- ja palkkakuluista kuin suora autokuljetus, jossa kyseiset kulut säilyvät käyttötuntia kohti vakiona. Suorassa autokuljetuksessa kuormatilojen täyttöaste on myös korkeampi, koska tienvarresta alkaen päästään kuljettamaan haketta rangon sijaan.

Toisaalta tienvarsihaketuksessa hakeautot joutuvat ajamaan hakkurin perässä, jos kuorma ei täyty ensimmäiseltä varastopaikalta. Järeän terminaalihakkurin tarjoama volyymietu ei pysty vielä 15000 m³/kk tasollakaan kumoamaan näitä lisäkustannuksia aiheuttavia tekijöitä.

Aiemmassa tutkimuksessa esitettyyn 100 km kannattavuusrajaan ei terminaalien kautta kulkevassa autokuljetusketjussa päästy. Tätä selittänevät tutkimuksen rajoitteissa esitettävät tekijät. Näitä ovat esimerkiksi toimitusvarmuus, terminaalihakkeen parempi laatu ja tienvarsihaketuksen pidemmät odotusajat, joiden merkitystä tämän tutkimuksen kustannuslaskenta ei pysty huomioimaan.

Alkukuljetusmatkalla terminaalisiin oli merkittävä vaikutus ketjujen kokonaiskustannuksiin ja kilpailukykyyn. Alkukuljetusmatkan kasvu 10 km:stä 50 km:iin nosti halvimman junakuljetuksen kannattavuusrajan suoraan autokuljetukseen verrattuna 70 – 80 km. Tutkittujen kuljetusvolyymien suuremmassa päässä (15000 m³/kk) vaikutus on lähempänä 70 km ja pienemmässä päässä (5000 m³/kk) lähempänä 80 km. Suhteellisesti kannattavuusrajan (km) nousu on kuitenkin selvästi voimakkaampaa suuremmilla volyyymeilla. Euromääräisesti tarkasteltuna alkukuljetusmatkan kasvu 10 km:stä 50 km:iin nosti molemmilla volyyymeilla kustannuksia 3 – 4 € varsinaisesta kuljetusmatkasta riippumatta. Terminaaliketjujen kilpailukykyyn kannalta terminaalien sijainnilla on merkittävä vaikutus. Energiapuun saanti terminaalien lähialueelta on ehdottomasti varmistettava. Lisäksi kuljetusyhteyksien on syytä olla kunnossa, jotta energiapuu saadaan terminaalisiin mahdollisimman suoraa ja hyväkuntoista ajoreittiä.

5.2 Tutkimuksen rajoitteet

Vaikka simulointimallit onkin pyritty tekemään todellisuutta vastaaviksi, on niissä aina yksinkertaistuksia, jotka vaikuttavat mallien todenmukaisuuteen. Tässä tutkimuksessa todennäköisesti merkittävin yksinkertaistus koskee kuljetuskaluston odotusaikoja, jotka on otettu keskimääräisillä arvoilla huomioon malleissa käytetyissä toiminta-ajoissa, mutta ne eivät tee eroa eri hankintaketjujen välillä. Yleisesti kuitenkin tiedetään, että tienvarressa odotusajat venyvät terminaalien pidemmiksi. Toisaalta tutkimuksessa on tienvarresta ajettu vain täysillä kuormilla ja

hakeauto on aina seurannut hakkurin perässä täydentämään vajaan kuormansa seuraavalle tienvarsivarastolle. Näin ei käytännön tilanteessa lähes täysillä kuormilla toimittaisi. Tämä tasapainottaa odotusajoissa syntyvää kustannusvääristymää. Kokonaisuutena tarkastellen malleihin sisältyvät yksinkertaistukset aiheuttavat vain vähän virhettä lopputuloksiin. Yksinkertaistukset vaikuttavat sekä kustannuksia laskevasti että nostavasti, jolloin ne kumoavat toistensa vaikutusta.

Ymmärrettävästi simulointimallit eivät pysty myöskään huomioimaan hankintaketjuissa ilmeneviä satunnaisia tekijöitä, kuten esimerkiksi kaluston yllättävistä hajoamisista tai sääolosuhteista aiheutuvia kustannuksia. Voidaan olettaa, että näillä olisi energiapuun laatutekijöistä, työskentelyolosuhteista ja kuuma ketju-ilmiöstä johtuen suurempi merkitys tienvarsihaketuksessa kuin terminaalihaketuksessa.

Metsäenergian hankintaketjujen osat (tienvarsivarasto, tienvarsihaketus, kuljetus, terminaali, purkutermiinali, käyttökohde) ovat käytännössä useiden toimijoiden hallussa, jolloin asetelman todenmukaisuuden vuoksi oli valittava kenen toimijan näkökulmasta asioita tarkastellaan. Valinta kohdistui terminaalin omistavaan toimijaan, koska terminaalin toiminta on ratkaisevassa asemassa terminaalihankintaketjujen kannattavuuden kannalta. Tästä seurasi, että ketjun muut osat asetettiin alihankkijoiden haltuun, eli niille maksettiin vain todellisista työsuoritteista. Tässä tapauksessa maksu tarkoitti todellisista työsuoritteista aiheutuvia kustannuksia ja vakioitua hallintokustannus- ja voittomarginaaliosuutta. Pääomakustannukset kohdistettiin alihankkijoiden hallussa oleville ketjun osille keskimääräisten vuotuisten käyttötuntien perusteella. Terminaalissa pääomakustannukset juoksivat koko mallinnuksen ajan. Näin ollen volyymin vaikutus näkyi tarkastelussa ainoastaan terminaalissa. Volyymien tulisi kuitenkin näkyä myös alihankkijoille maksetuissa suoritteissa, koska pienillä volyyymeilla alihankkijat käytännössä hinnoittelisivat voittomarginaalit korkeammiksi kuin suurilla volyyymeilla. Tästä johtuen kustannukset jäävät todennäköisesti hieman liian mataliksi pienillä volyyymeilla. Volyymilla 15000 m³/kk vaikutusta ei enää juuri ole. Vaikutus näkyy myös terminaalihankintaketjujen ja suoran autokuljetusketjun välisessä kannattavuusvertailussa, koska suora autokuljetusketju on kokonaisuudessaan alihankkijoiden hallussa.

Vaikka tässä tutkimuksessa onkin pyritty ottamaan huomioon kaikki hankintaketjuille kustannuksia aiheuttavat tekijät, jää joitakin merkittäviä kannattavuuteen vaikuttavia tekijöitä silti huomioimatta. Näistä tärkein on ehdottomasti terminaalien ansiosta paraneva toimitusvarmuus. Se on yksittäisenä, terminaalien perustamista puoltavana, tekijänä usein jopa tärkeämpi kuin terminaalilla tavoiteltavat suorat kustannussäästöt. Toimitusvarmuus on tekijä, jota on kustannusperusteisissa malleissa vaikea huomioida, koska kustannuksia aiheutuu vain, jos ketjun toimitusvarmuus pettää. Suoralle autokuljetusketjulle aiheutuu lisäkustannuksia terminaaliketjuihin verrattuna myös sellaisista tekijöistä kuin talvinen teidenauraus, logistiikan hallinta ja hakkeen heikompi laatu. Nämä kustannustekijät jäävät myös mallinnuksen ulkopuolelle.

Yksi tärkeä kustannustekijä kaikissa energiapuun hankintaketjuissa on hävikki. Hävikkiä tulee väistämättä ketjun jokaisessa vaiheessa. Tutkimuksessa tarkastellulla rangalla hävikki on selvästi pienempää kuin kokopuulla tai hakkuutähteellä, koska mekaanista hävikkiä tulee vähemmän. Rangallakin sitä kuitenkin syntyy erityisesti haketusilanteissa, jolloin osa hakkeesta menee kuorman ohi. Tämä ketjujen kustannuksia lisäävä vaikutus on vähäinen. Toinen näkökulma hävikkiin on tarkasteltujen ketjujen väliset hävikkierot. Sekä mekaaninen hävikki että biologisista hajoamisprosesseista johtuva hävikki ovat todennäköisesti suurempia tienvarressa kuin terminaalissa. Tienvarressa haketuksen seurauksena haketta menee hukkaan enemmän kuin terminaalissa. Todennäköisesti tienvarren heikompi kuivuminen aiheuttaa lisäksi sen, että biologiset hajoamisprosessit hajottavat puuainesta nopeammin kuin terminaalissa.

Simulointimalleissa on laskettu energiapuun varastoinnista aiheutuvat pääomakulut vuoden varastointiajan mukaan. Tämä pätee kaikkiin tarkasteltuihin hankintaketjuihin. Energiapuu tarvitsee pitkän varastointiajan, jotta se kuivuu. Näin vältytään turhan veden kuljettamiselta ja saadaan energiapuu kuivumaan polttokelpoiseksi. Mallit eivät kuitenkaan huomioi sitä, että terminaaliketjuissa merkittävä osa kuivumisajasta kuluu terminaalissa. Tästä seuraa, että alkukuljetusmatkasta terminaaliin aiheutuvista kustannuksista ei aiheudu korkokustannuksia siltä ajalta, jonka varastointivaihe terminaalissa kestää. Kustannusvaikutus on tilanteessa, jossa koko vuoden varastointi tapahtuu

terminaalissa ja alkukuljetusmatka on 10 km, noin 0,12 €/m³. Vastaavasti 50 km alkukuljetusmatkalla kustannusvaikutus olisi noin 0,25 €/m³. Ketjun kokonaiskustannuksiin suhteutettuna tällä olisi ääritapauksessakin maksimissaan vain alle 2 % vaikutus.

5.3 Tulosten yleistettävyys ja hyödynnettävyys

Kaikki kustannusvertailut perustuvat tiettyihin valittuihin kustannus- ja kapasiteettitekijöihin. Hankintaketjut kuitenkin eroavat paljon toisistaan esimerkiksi käytetyn kaluston suhteen. Kaluston huolto-, polttoaine- ja vakuutusmaksut, kapasiteetit, pitoajat ym. vaihtelevat. Samankin koneen hankintahinta on erilainen ostajasta riippuen. Myös terminaalien perustamiskustannukset voivat vaihdella huomattavasti sijainnista riippuen. Tästä ymmärrettävästi seuraa, etteivät tutkimuksessa esitetyt laskelmat sovi sellaisenaan yksittäisen tilanteen arviointiin. Jos tuloksia halutaan käyttää yksittäisen tapauksen arviointiin, on ensin syytä perehtyä tässä tutkimuksessa käytettyihin kustannus- ja kapasiteettitekijöihin ja arvioitava kuinka paljon ne poikkeavat tarkastelun kohteena olevasta tilanteesta. Tässä tutkimuksessa käytetyt kustannus- ja kapasiteettitekijät on pyritty valitsemaan siten, että ne edustaisivat keskimäärin kentällä vallitsevaa nykytilannetta. Tutkimustiedon puuttuessa keskimääräisyys perustuu kuitenkin usean tekijän osalta tutkijan arvioon. Tutkimuksessa esitetyt tulokset soveltuvat hankintaketjujen kilpailukyvyyn ja kustannusten arviointiin yleisellä tasolla.

Tuloksia voidaan hyödyntää erityisesti suunniteltaessa terminaalin perustamista tai arvioitaessa jo olemassa olevan terminaalin kuljetusratkaisuja. Tulosten avulla voidaan arvioida monipuolisesti volyymin, kuljetusmatkan ja alkukuljetusmatkan vaikutusta terminaalihankintaketjujen kannattavuuteen. Myös molempia kuljetustapoja hyödyntävien terminaalien kannattavuusarvioinnit ovat mahdollisia. Parhaiten tulokset soveltuvat rangan hankintaketjujen arviointiin.

Jokainen yrittäjä tekee kuitenkin lopulliset, omiin tarpeisiinsa soveltuvat, laskelmat itse ja myös vastaa niistä. Tämän tutkimuksen tulokset ovat näiden laskelmien tukena.

5.4 Luotettavuus

Tutkimuksen luotettavuutta arvioitaessa on simulointitutkimuksen kyseessä ollessa loogista jakaa tarkastelu simulointimallien luotettavuustarkasteluun ja malleihin syötettyjen lähtöarvojen luotettavuustarkasteluun. Nämä ratkaisevat sen, kuinka luotettavia mallien antamat tulokset ovat.

Simulointimallien luotettavuus perustuu huolelliseen verifiointiin ja validointiin. Verifioimalla varmistutaan, että malli toimii siten kuin sen on ajateltu toimivan. Validoinnilla taas varmistutaan, että malli vastaa todellisuutta. Validointi voidaan jakaa kahteen tekijään: riittävään tarkkuuteen ja mallin soveltuvuuteen suunniteltuun käyttötarkoitukseen. Verifiointia ja validointia on tässä tutkimuksessa tehty mallien taustalla olevien kaavojen tarkastamisen lisäksi ajamalla malleja ääriarvoilla.

Yleensä tutkimuksen luotettavuuden arvioinnissa käytetty reliabiliteetti soveltuu simulointimallien arviointiin huonosti, koska se osoittaa mittarin johdonmukaisuutta eli, että mittari antaa samasta tilanteesta eri mittauskerroilla saman lopputuloksen. Matemaattisiin yhtälöihin perustuva deterministinen simulointimalli antaa samoilla lähtöarvoilla aina saman lopputuloksen, joten tällainen arviointi ei ole tarpeellista.

Muuttamalla mallin kahden peräkkäisen vaiheen arvoja laidasta laitaan havaitaan yleensä varsin helposti mallissa olevat puutteet. Näin on tehty tässä tutkimuksessa kaikkien simulointimallien energiapuun hankintaketjuille. Energiapuun hankintaketju on esitetty kuviossa 5 mustalla värillä. Tämä varsinainen materiaalivirtaa kuvaava mallin osa on erityisen riippuvainen edeltävästä ja seuraavasta vaiheesta. Näin myös puutteet ja epäloogisuudet tulevat selkeästi ja nopeasti esille, niin itse materiaalivirtaa kuvaavasta mallin osasta kuin sitä ohjaavista muuttujista. Mallien osia on myös ajettu itsenäisesti inaktivoimalla muut mallin osat. Näin voidaan keskittyä tarkastelemaan vain tietyn mallin osan toiminnan loogisuutta ilman, että muut osat vaikeuttavat havainnointia. Mallien antamia tuloksia on lisäksi verrattu aiemman tutkimuksen tuloksiin. Näin on tehty sekä mallien antamille kokonaistuloksille että osatuloksille.

On selvää, etteivät mallit ole huolellisen verifioinnin ja validoinnin jälkeenkään täydellisiä ja virheettömiä. Kuitenkin suurella todennäköisyydellä malleissa olevat virheet eivät ratkaisevasti heikennä lopputuloksia. Malleilla on tehty ajoja niin monilla eri arvoilla ja arvoyhdistelmillä, että suuremmat virheet ovat sinä aikana tulleet esille ja ne korjattu. Tästä kertovat myös lopputulosten loogisuus ja toisaalta yhdenmukaisuus aiemman tutkimuksen kanssa.

Malleissa on tarkoituksellisia yksinkertaistuksia, jotka jossain määrin vaikuttavat lopputulosten luotettavuuteen. Lopputulosten kannalta merkityksellisimmät tarkoitukselliset yksinkertaistukset ovat jo aiemmin mainitut autojen odotusaikojen huomioiminen keskimääräisinä ja se, että tienvarsivarastoilta on aina ajettu käyttökohteelle täysillä kuormilla. Hankintaketjut ovat perustoimintaperiaatteeltaan suhteellisen selkeitä, joten tahottomia yksinkertaistuksia ei malleissa todennäköisesti juuri ole. Monimutkaisuutta malleihin tuovat pääasiassa kustannusmuuttujien suuri määrä ja jossain määrin varsinaisen materiaalivirtaa kuvaavan osan ohjaamiseen käytettyjen muuttujien dynaaminen monimutkaisuus.

Lisäksi on vielä myös luotettavuuden näkökulmasta korostettava, että malleihin syötetyt lähtöarvot ovat aina tapauskohtaisia. Ei voida määrittää yleispäteviä ”oikeita” arvoja. Tutkimuksen tavoitteena oli käyttää kustannusarvoja, jotka edustaisivat keskimäärin nykyään kentällä vallitsevaa tilannetta. Keskimääräisyys perustui kuitenkin usean tekijän osalta tutkijan arvioon. Tällä ei ole luotettavuuden kannalta suurta merkitystä, koska käytetyt arvot on esitetty ja niiden pohjalta on mahdollista arvioida tutkimustulosten luotettavuutta eri tilanteissa. Silloin, kun tuloksia halutaan käyttää keskimääräiseen arviointiin, on hyväksyttävä, että kaikki käytetyt lähtöarvot eivät ole tutkitusti keskimääräisiä, vaan perustuvat arvioon. Lähtöarvojen oikeellisuutta on pyritty varmistamaan useammasta lähteestä, jotta arviolle keskimääräisyydestä olisi paremmat lähtökohdat. Pienen virheen mahdollisuus tässä on kuitenkin hyväksyttävä.

Kokonaisuutena tarkastellen tämän tutkimuksen tuloksia voidaan pitää varsin luotettavina.

5.5 Jatkotutkimustarpeet

Tärkeimmät jatkotutkimuskohteet löytyvät tämän tutkimuksen rajoitteista. Toimitusvarmuuden euromääräiselle arvottamiselle olisi hyvä löytää jatkossa joitain työkaluja, jotta terminaalitoiminnan kannattavuudesta saataisiin selkeämpi kokonaiskuva. Toinen merkittävä tutkimuskohde olisi terminaalista ja tienvarresta tulevan hakkeen laadun vertaaminen, mikä edelleen tarkentaisi tienvarsihankintaketjun ja terminaalihankintaketjujen välistä kilpailuasetelmaa. Lisäksi olisi tarpeellista tehdä laskelmia tienvarsihaketuksen lisäkustannuksista, kuten teiden aurauksesta, logistiikan hallinnasta ja kuuma ketju -ilmiön vaikutuksista ja arvioida tämän jälkeen uudestaan tienvarsihaketuksen kannattavuutta. Myös odotusaikoja eri hankintaketjuissa voisi olla hyödyllistä selvittää.

Meno-paluukuljetukset parantavat merkittävästi hankintaketjujen kannattavuutta. Tällainen tarkastelu voisi olla mielekästä tehdä esimerkiksi case -tyyppisenä. Terminaalitoimintaan yhdistettynä meno-paluukuljetuksilla on paremmat toimintaedellytykset kuin tienvarresta lähteviin kuljetuksiin yhdistettynä.

Viime aikoina on pohdittu ja myös tutkittu maantiekuljetuksissa sallittavien kuormakokojen kasvattamista. Voisi olla mielekästä tarkastella kuormakokojen kasvattamisen vaikutusta maantiekuljetusten kilpailukykyyn esimerkiksi simulointimenetelmää hyödyntäen.

Terminaalien yhteiskäyttöä aines- ja energiapuun sekä mahdollisesti muiden biopolttoaineiden ja turpeen varastointiin ja jalostukseen olisi tarpeen selvittää. Näiden raaka-aineiden käsittelyyn soveltuvat monilta osin samat koneet, jolloin tuomalla näiden käsittely samalle terminaalialueelle voitaisiin mahdollisesti saavuttaa synergia- ja volyymietuja.

Volyymin vaikutusta bioenergian hankintaketjujen kannattavuuteen voisi terminaalien ohella tarkastella myös muilla ketjun osilla eli lähinnä kuljetuksissa ja tienvarsihaketuksessa. Myös yhdistelmät, joissa pidempi osa ketjua (esim. alkukuljetus ja terminaalitoiminnot) olisi yhden toimijan hallussa, olisivat volyymin vaikutuksen kannalta mielenkiintoisia.

Tarpeellisia olisivat edelleen myös eri metsäenergiamuotojen (karsittu ranka, kokopuu, kannot, hakkuutähteet) hankintaketjujen kustannusvertailut eri haketus- ja varastointipaikoilla sekä kuljetustavoilla. Lähes kaikista näistä löytyy tutkimustietoa, mutta samassa tutkimuksessa ei yleensä ole tarkasteltu kuin muutamaa yhdistelmää. Eri tutkimusten kustannuslaskelmien vertaaminen ei useinkaan ole aivan yksinkertaista eri lähtökohdista ja laskentaperusteista johtuen.

LÄHTEET

- Allen, J., Browne, M., Hunter, A., Boyd, J. & Palmer, H. (1998). Logistics management and costs of biomass fuel supply. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 28(6), 463 – 477.
- Anerud, E. & Jirjis, R. (2011). Fuel quality of Norway spruce stumps – influence of harvesting technique and storage method. *Scandinavian Journal of Forest Research* 26, 257 – 266.
- Asikainen, A. (1995). Discrete-event simulation of mechanized wood-harvesting systems. Väitöskirjatutkimus. Research Notes 38. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta, Joensuu.
- Asikainen, A. (1998). Chipping Terminal Logistics. *Scandinavian Journal of Forest Research* 13, 386 – 391.
- Asikainen, A. & Nuuja, J. (1999). Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1999, 479 – 490.
- Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. & Hämäläinen, J. (2001). Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopisto, Metsätieteellinen tiedekunta. *Tiedonantoja* 131. 107 s.
- Banks, J. (1998). Principles of Simulation. Teoksessa: Banks, J. (toim.). *Handbook of Simulation*. Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia: John Wiley & Sons, Inc., 3 – 30.
- Christopher, M. (2005). Logistics and Supply Chain Management. *Creating Value-Adding Networks*. Harlow: Pearson Education Limited.
- Crill, P., Hargreaves, K. & Korhola, A. (2000). Turpeen asema Suomen kasvihuonekaasutaseissa. Kauppa- ja teollisuusministeriö. 70 s.
- Enström, J. (2009). Terminalhantering för effektivare järnvägstransporter av skogsbränsle. *Resultat* 13/2009. Skogforsk, Uppsala.
- Fogelholm, J. (1997). *Tuotantolaitosten laskentajärjestelmät ja niiden kehittäminen*. Espoo: Suomen ATK-kustannus Oy.
- Fredriksson, T., Hartikainen, H., Jauhiainen, M., Luoma, K., Marjamäki, M., Nuutila, M., Rautanen, J., Sirén, P. & Yrjölä, J. (2002). Hakelämpökeskuksen hankinta. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Suomen kuntaliitto.
- Gudehus, T. & Kotzab, H. (2009). *Comprehensive Logistics*. Berlin: Springer.
- Haikonen, T. (2005). Tutkimus biopolttoaineen aumakuivauksesta. Motiva Oy, Helsinki.

- Hakkila, P. (2004). Puuenergian teknologiaohjelma 1999 – 2003. Metsähakkeen tuotantoteknologia. Loppuraportti. VTT, Helsinki.
- Hakkila, P. (2006). Selvitys energiapuun mittauksen järjestämisestä ja kehittämisestä. Työryhmämuistio MMM 2006: 8. Maa- ja metsätalousministeriö, Helsinki.
- Halonen, P. & Vesisenaho, A. (2002). Hakeautoseuranta. Hankeraportti. VTT, Jyväskylä.
- Harrington, H. J. & Tumay, K. (2000). *Simulation Modeling Methods*. New York: McGraw-Hill.
- Heikkilä, J., Laitila, J., Tanttu, V., Lindblad, J., Sirén, M., Asikainen, A., Pasanen, K. & Korhonen, K. T. (2005). Karsitun energiapuun korjuuvaihtoehdot ja kustannustekijät. Metlan työraportteja 10. Metsäntutkimuslaitos, Helsinki.
- Ihalainen, T. & Niskanen, A. (2010). Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjuissa. Metlan työraportteja 166. Metsäntutkimuslaitos, Vantaa.
- Iikkanen, P. & Siren, J. (2005). Rautatiekuljetusten kilpailukyky Suomessa. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 44/2005. Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki.
- Ikäheimo, J. & Asikainen, A. (1999). Polttohakkeen tuotantomenetelmien tuottavuus ja kustannukset. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1999, 491 – 503.
- Impola, R. & Tiihonen, I. (2011). Biopolttoaineterminaalit. Ohjeistus terminaalin perustamiselle ja käytölle. VTT, Jyväskylä.
- Karjalainen, T. (2006). Kainuun bioenergiaohjelma 2006 – 2010. Working Papers 57. Oulun yliopisto, Kajaani.
- Karttunen, K., Föhr, T. & Ranta, T. (2010). Energiapuuta Etelä-Savosta. Tutkimusraportti 7. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, Lappeenranta.
- Kelton, W., Sadowski, R. & Sadowski, D. (2002). *Simulation with Arena*. New York: McGraw-Hill.
- Kiema, M., Pasanen, K. & Parviainen, J. (2005). Bioenergian logistiikka. Loppuraportti. Kuopion yliopisto, Ympäristötieteiden laitos, Kuopio.
- Kuitto, P.-J. (2005). Hakeautokalustosta. Teoksessa: Kuitto P.-J. (toim.). *Metsästä polttoaineksi – Polttohakkeen tuotannon puoli vuosisataa*. Jyväskylä: FINBIO – Suomen Bioenergiayhdistys ry, 305 - 306.
- Kuitto, P.-J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. (1994). Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Metsätehon tiedotus 410. Metsäteho, Vantaa.

- Kärhä, K. (2010). Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2009. Metsätehon tulosalvosarja 9/2010. Metsäteho, Vantaa.
- Kärhä, K. (2011). Industrial supply chains and production machinery of forest chips in Finland. *Biomass & Bioenergy* 35, 3404 – 3413.
- Kärhä, K., Elo, J., Lahtinen, P., Räsänen, T., Keskinen, S., Saijonmaa, P., Heiskanen, H., Strandström, M. & Pajuoja, H. (2010a). Kiinteiden polttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa vuonna 2020. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 66/2010. Työ- ja elinkeinoministeriö, Helsinki.
- Kärhä, K., Elo, J., Lahtinen, P., Räsänen, T. & Pajuoja, H. (2009). Puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa 2020. Metsätehon katsaus 40. Metsäteho, Vantaa.
- Kärhä, K., Hautala, A. & Mutikainen, A. (2011). Jenz HEM 581 DQ hakkuutähteiden ja pienpuun tienvarsihaketuksessa. Metsätehon tulosalvosarja 5/2011. Metsäteho, Vantaa.
- Kärhä, K. & Mutikainen, A. (2011). Jenz HEM 820 DL runkopuun terminaalihaketuksessa. Metsätehon tulosalvosarja 13/2011. Metsäteho, Vantaa.
- Kärhä, K., Mutikainen, A. & Hautala, A. (2010b). Vermeer HG6000 terminaalihaketuksessa ja –murskauksessa. Metsätehon tulosalvosarja 15/2010. Metsäteho, Vantaa.
- Laitila, J., Asikainen, A. & Anttila, P. (2008). Energiapuuvarat. Teoksessa: Kuusinen, M. & Ilvesniemi, H. (toim.). Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset. Tutkimusraportti. Helsinki: Metsäntutkimuslaitos ja Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, 6 – 12. Saatavilla: <http://www.metsavastaa.net/files/metsavastaa/Energiaseminaari%2020112007/Energiapuun_korjuun_ymparistovaikutukset.pdf>
- Laitila, J., Asikainen, A., Sikanen, L., Korhonen, K. & Nuutinen, Y. (2004). Pienpuuhakkeen kustannustekijät ja toimituslogistiikka. Metlan työraportteja 3. Metsäntutkimuslaitos, Helsinki.
- Laitila, J., Leinonen, A., Flyktman, M., Virkkunen, M. & Asikainen, A. (2010). Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. VTT tiedotteita 2564. VTT, Helsinki.
- Laitila, J. & Väätäinen, K. (2011). Kokopuun ja rangan autokuljetus ja haketustuottavuus. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2011, 107 – 126.
- Laurila, J. & Lauhanen, R. (2010). Moisture content of Norway spruce stump wood cutting areas and roadside storage sites. *Silva Fennica* 44(3), 427 – 434.
- Laurila, J. & Lauhanen, R. (2012). Weight and volume of small-sized whole trees at different phases of the supply chain. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27, 46 – 55.

- Law, A. & Kelton, W. (2000). *Simulation modeling and analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Metsäkonealan työehtosopimus (2011). Puuliitto, Helsinki. Saatavilla: <http://www.puuliitto.fi/files/932/Metsakonealan_tyoehtosopimus_1_03_2011-31_01_2014.pdf>. Viitattu 19.6.2012.
- Oksanen, R. (2003). Kuljetusten toimintolaskennan sovellukset ja toteutus. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 17/2003. Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki.
- Pajuoja, H. & Kärhä, K. (2011). Kesla C645A pienpuun tienvarsihaketuksessa. Metsätehon tulosalvosarja 17/2011. Metsäteho, Vantaa.
- Perälä, T., Perälä, M. & Myllylä, M. (2011). Biotermiinalin liiketoimintaselvitys. Loppuraportti. Viisari ry.
- Pettersson, M. & Nordfjell, T. (2007). Fuel quality changes during seasonal storage of compacted logging residues and young trees. *Biomass & Bioenergy* 31: 782 – 792.
- Pihlajamäki, P. & Salo, T. (2010). Kainuun biomassatermiinalihankkeen toteutettavuusselvitys. Pöyry Management Consulting, Kainuun Etu Oy, Vantaa.
- Pundoor, G. & Herrmann, J. W. (2006). A hierarcial approach to supply chain simulation modeling using the Supply Chain Operations Reference model. *International Journal of Simulation and Process Modelling* 2(3/4), 124 – 132.
- Ranta, T. (2002). Logging residues from regeneration fellings for biofuel production – A GIS-based availability and supply cost analysis. Väitöskirjatutkimus. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 128. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.
- Rautateiden verkkoselostus 2013. (2011). Liikenneviraston väylätietoja 2/2011. Liikennevirasto, Helsinki. Saatavilla: <http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lv_2011-02_rautateiden_verkkoselostus_web.pdf>
- Rimpiläinen, T. (2007). Sairaalan materiaalivirtojen mallintaminen ja simulointi. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Systemiteknikan laboratorio, Espoo.
- Rinne, S. (2010). Energiapuun haketuksen ja murskauksen kustannukset. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Energiateknikan osasto, Lappeenranta.
- Rinne, S., Karttunen, K., Korpinen, O-J., Ranta, T. & Handelberg, J. (2010). Termiinali liiketoimintana. Teoksessa: Karttunen, K., Föhr, T. & Ranta, T. (toim.). Energiapuuta Etelä-Savosta. Tutkimusraportti 7. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta, 125 – 145.
- Robinson, S. (2004). *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

- Ryymin, R., Pohto, P., Laitila, J., Humala, I., Rajahonka, M., Kallio, J., Selosmaa, J., Anttila, P. & Lehtoranta, T. (2008). Metsäenergian hankinnan uudistaminen. Loppuraportti 12/2008. Jyväskylän Energia Oy, HSE Executive Education Oy, Metsäntutkimuslaitos, Jyväskylä.
- Saranen, J. (2009). Enhancing the efficiency of freight transport by using simulation. Väitöskirjatutkimus. Acta Universitatis Lappeenrantaensis 342. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Lappeenranta.
- Savon Voima Oy:n Bioenergiaohjelma. (2001). Savon Voima Oy, Kuopio.
- Searcy, E., Flynn, P., Ghafoori, E. & Kumar, A. (2007). The Relative cost of biomass energy transport. *Applied Biochemistry and Biotechnology* 2007 (137 – 140), 639 – 652.
- Seppänen, N. (2011). Valtimon bioterminaali. Pielisen Karjalan Kehittämiskeskus Oy, Valtimo.
- Simchi-Levi, D., Kaminsky, P. & Simchi-Levi, E. (2008). *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies*. New York: McGraw-Hill Companies.
- Solakivi, T., Ojala, L., Lorentz, H., Laari, S. & Töyli, J. (2012) Logistiikkaselvitys 2012. Julkaisuja 11/2012. Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki.
- Solakivi, T., Ojala, L., Töyli, J., Hälinen, H-M., Lorentz, H., Rantasila, K., Huolila, K. & Laari, S. (2010). Logistiikkaselvitys 2010. Julkaisuja 36/2010. Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsinki.
- Strandström, M. (2012). Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2011. Metsätehon tulosalvosarja 4/2012. Metsäteho, Vantaa.
- Tahvanainen, T. & Anttila, P. (2011). Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland. *Biomass & Bioenergy* 35, 3360 – 3375.
- Tietoa bioenergiasta. Biomassasta energiaa. (2010). Saatavilla: <http://www.bioenergia.fi/default/www/etusivu/tietoa_bioenergiasta> Viitattu 24.11.2011.
- Torvelainen, J. (2011). Puun korjuu ja kuljetus. Teoksessa: Ylitalo, E. (toim.). Metsätalastollinen vuosikirja 2010. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos, 195 – 214.
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2010). Uusiutuvan energian velvoitepaketti. Saatavilla: <http://www.tem.fi/files/26643/UE_lo_velvoitepaketti_Kesaranta_200410.pdf> Viitattu 31.8.2011.
- Väkevä, J., Pennanen, O. & Örn, J. (2004). Puutavara-autojen polttoaineen kulutus. Metsätehon raportti 166. Metsäteho, Vantaa.

- Väätäinen, K., Asikainen, A. & Sikanen, L. (2006). Metsäkoneiden siirtokustannusten laskenta ja merkitys puunkorjuun kustannuksissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2006, 391 – 397.
- Ylitalo, E. (2011). Energia. Teoksessa: Ylitalo, E. (toim.). Metsätilastollinen vuosikirja 2011. Vantaa: Metsäntutkimuslaitos, 289 – 314.
- Ympäristöministeriö. (2008). Pitkän aikavälin ilmasto- ja energiastrategia. Ympäristöministeriön sektoriselvitys. Ympäristöministeriön raportteja 19/2008.

