

Metsähakkeen tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotannon  
logistiikan kestävyysvaikutukset Päijät-Hämeessä

Mika Korvenranta 175534

Itä-Suomen yliopisto

Historia- ja maantieteiden laitos

Yhteiskuntamaantieteen Pro gradu -tutkielma

Ohjaajat: Timo Kumpula ja Markku Tykkyläinen

Tammikuu 2014

# ITÄ-SUOMEN YLIOPISTO – UNIVERSITY OF EASTERN FINLAND

<b>Tiedekunta – Faculty</b> Yhteiskuntatieteiden ja kauppätieteiden tiedekunta		<b>Osasto – School</b> Historia- ja maantieteiden laitos	
<b>Tekijä – Author</b> Mika Korvenranta			
<b>Työn nimi – Title</b> Metsähakkeen tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutukset Päijät-Hämeessä			
<b>Pääaine – Main subject</b> Yhteiskuntamaantiede	<b>Työn laji – Level</b> Pro gradu -tutkielma	<b>Päivämäärä – Date</b> 8.1.2014	<b>Sivumäärä – Number of pages</b> 100
<b>Tiivistelmä – Abstract</b> <p>Euroopan unionin asettamien tavoitteiden mukaan uusiutuvan energian käyttö on nostettava Suomessa 38 prosenttiin energian loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Metsähakkeella on merkittävä rooli tavoitteiden saavuttamisessa, minkä takia metsähakkeen käyttöä pyritään nostamaan huomattavalla tavalla Suomessa. Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena on selvittää, miten metsähakkeen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutukset muuttuvat tuotannon lisäämisen johdosta käytetyillä tuotantotavoilla.</p> <p>Tuotannon kestävyysvaikutuksia tarkastellaan vertailemalla keskitettyä ja hajautettua energiantuotantoa eli terminaali- ja tienvarsihaketuksen tuotantomallia. Aihetta on tutkittu asiantuntijahaastatteluiden, ToSIA-työkalun ja paikkatietomenetelmien avulla. Asiantuntijahaastatteluilla on saatu tietoa Päijät-Hämeen metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten alueellisista erityispiirteistä ja määritetty optimaalinen terminaaliverkosto. Paikkatietomenetelmillä on rakennettu logistiikkamalli metsähakkeen optimaalisen materiaalivirran selvittämiseksi tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotantoketjuilla. Paikkatietomenetelmillä arvioitiin kestävyysvaikutuksia sekä logistiikkamallilla että kuljetusesteiden ja liikenneonnettomuusaineistolla tehdyn <i>Hot Spot</i> -analyysien avulla. ToSIA-työkalulla on arvioitu tuotannon kestävyysvaikutuksia sosiaalisesta, taloudellisesta ja ekologisesta näkökulmasta. Kolmen menetelmän avulla voidaan arvioida kestävyysvaikutuksia monipuolisesti eri näkökulmista.</p> <p>ToSIA-työkalulla ja paikkatietoanalyysillä tarkasteltuna tienvarsihaketuksen tuotantoketjua voidaan pitää kestävämpänä vaihtoehtona. Tienvarsihaketuksen tuotantoketjusta aiheutuu vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä, tuotantokustannukset ovat matalammat ja tieverkon kuormitus vähäisempää. Terminaalihaketuksessa on puolestaan parempi työllistävä vaikutus. Asiantuntijahaastatteluiden perusteella erityisesti työllisyysvaikutukset ja tuotantovarmuus nousivat tärkeimpinä näkökulmina metsähakkeen tuotannon kestävyuden arvioinnissa, minkä perusteella terminaalihaketusta voidaan pitää kestävämpänä tuotantomallina.</p> <p>Metsähakkeen tuotannon lisäämisen myötä kestävyysvaikutuksissa tapahtuu väistämättä muutoksia. Tuotantoketjujen ja energiapuulajien suhteellinen osuus tuotannossa vaikuttaa merkittävästi kestävyysvaikutusten muutoksiin. Tuotannon kasvun myötä kuljetusmatkat tulevat väistämättä pidentymään, mikä heikentää taloudellista ja ekologista kestävyyttä. Tutkielmassa on kuitenkin osoitettu, että logistiikan ja materiaalivirtojen hallinnalla vaikutetaan oleellisesti tuotannon kannattavuuteen. Metsähaketerminaalien maantieteellinen sijainti vaikuttaa keskeisellä tavalla tuotannon logistiikan kestävyteen. Terminaalien sijoittaminen oikealle paikalle oikealla mitoituksella vaikuttaa myönteisesti ekologiseen, taloudelliseen ja sosiaaliseen kestävyteen. Metsähakkeen tuotannon suurin kuormitus kohdistuu erityisesti metsähaketerminaalien ja käyttökohteiden läheisyyteen, mikä korostaa entisestään terminaalien sijainnin suunnittelun tärkeyttä.</p>			
<b>Avainsanat – Keywords</b> Metsähake, tuotantomalli, tienvarsihaketus, terminaalihaketus, kestävyys, logistiikka, paikkatieto, ToSIA			

# Sisältö

## Esipuhe

<b>1 Johdanto.....</b>	<b>5</b>
<b>2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset.....</b>	<b>7</b>
<b>3 Kestävä metsähakkeen tuotanto.....</b>	<b>8</b>
3.1 Mitä on metsäenergia? .....	8
3.2 Metsähakkeen tuotantoketjujen logistiikka.....	8
3.2.1 Metsähaketerminaali terminaalihaketuksen tuotantoketjussa .....	10
3.2.2 Metsähaketerminaalin sijainnin suunnittelu .....	11
3.3 Kestävyys metsähakkeen tuotannossa.....	13
<b>4 Metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten arviointi .....</b>	<b>15</b>
4.1 Systemi materiaalivirta-analyysin lähtökohtana.....	15
4.2 Metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten arviointi .....	16
4.3 ToSIA-työkalu kestävyysvaikutusten arvioinnissa .....	18
4.3.1 Materiaalivirran laskeminen .....	19
4.3.2 Indikaattorit ToSIA:ssa .....	22
4.4 Paikkatietomenetelmät metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten arvioinnissa ..	23
<b>5 Metsähakkeen materiaalivirrat Päijät-Hämeessä .....</b>	<b>25</b>
5.1 Metsähakkeen tuotannon alueelliset edellytykset .....	25
5.2 Metsähakkeen käytön ja potentiaalın vertailua .....	27
<b>6 Aineistot ja menetelmät .....</b>	<b>31</b>
6.1 Paikkatietoaineistot .....	33
6.2 Asiantuntijahaastattelut .....	35
6.3 <i>Network Analyst</i> .....	36
6.4 <i>Hot Spot</i> -analyysi .....	38
6.5 Metsähakkeen tuotannon paikkatietopohjaisen logistiikkamallin laskeminen .....	40
6.5.1 Kestävyysvaikutusten arviointi paikkatietopohjaisen logistiikkamallin avulla.....	42
6.6 Metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten laskeminen ToSIA-työkalulla .....	43
6.6.1 Indikaattorit ToSIA-työkalussa .....	47
6.7 Menetelmien luotettavuuden arviointi .....	48
<b>7 Asiantuntijahaastatteluiden tulokset .....</b>	<b>50</b>
7.1 Metsähakkeen tuotanto Päijät-Hämeessä.....	50

7.2 Metsähakkeen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutukset.....	51
7.3 Metsähaketerminaalien sijoittelu .....	52
<b>8 Paikkatietomenetelmien ja ToSIA:n kestävyysvaikutusten arvioinnin tulokset .....</b>	<b>56</b>
8.1 Metsähakkeen tuotannon paikkatietopohjainen logistiikkamalli Päijät-Hämeessä .....	56
8.2 Metsähakkeen tuotannon kuljetuksien esteet .....	60
8.3 Liikenneonnettomuudet Päijät-Hämeessä .....	62
8.4 Kestävyysvaikutukset logistiikkamallilla ja <i>Hot Spot</i> -analyseillä arvioituna .....	64
8.5 Tuotantokustannukset ToSIA-työkalulla arvioituna .....	70
8.6 Työllisyysvaikutukset ToSIA-työkalulla arvioituna .....	71
8.7 Kasvihuonekaasupäästöt ToSIA-työkalulla arvioituna.....	73
<b>9 Pohdinta .....</b>	<b>76</b>
9.1 Metsähakkeen tuotannon lisäämisen kestävyysvaikutukset Päijät-Hämeessä.....	76
9.2. Metsähaketerminaalien vaikutukset logistiikan kestävyteen Päijät-Hämeessä.....	79
9.3 Metsähakkeen tuotannosta johtuvat alueelliset ongelmakohdat Päijät-Hämeessä.....	80
<b>10 Johtopäätökset.....</b>	<b>82</b>
<b>LÄHTEET .....</b>	<b>85</b>
<b>LIITTEET .....</b>	<b>91</b>

## **Esipuhe**

Tein kandidaattitutkielmani metsäenergian kestävyysvaikutuksista ja halusin jatkaa saman aihepiirin parissa myös pro gradussani. Metsäenergian tutkimuksessa yhdistyvät ihmisen ja luonnon monimutkaiset järjestelmät, jossa logistiikka on merkittävässä osassa kestävä metsäenergian tuotantoa. Systeeminäkökulma antaa hyvät eväät ihmisen ja luonnon vuorovaikutuksen maantieteelliseen tutkimiseen.

Sain mahdollisuuden metsäenergian tutkimiseen Päijät-Hämeen liitolta, jonne tein opinnäytetyön toimeksiantona. Päijät-Hämeessä on käynnissä kokonismaakuntakaavan laadinta. Maakuntavaltuusto on asettanut maakuntakaavatyölle tavoitteen selvittää metsäenergiaterминаaleille järkeviä sijoituspaikkoja maakunnan tulevaisuuden tarpeet ja kestävä kehityksen periaatteet huomioiden. Päijät-Hämeen ilmasto- ja energiaohjelman tavoitteena on, että vuonna 2035 valtaosa maakunnan energiasta tuotetaan uusiutuvilla energiamuodoilla, ja metsäenergialla on tavoitteen toteutumisessa merkittävä rooli. Tutkielman tuloksilla saadaan tietoa sekä metsäenergian tuotannon kestävyysvaikutuksista Päijät-Hämeen alueella että maakuntakaavan ehdotusvaiheen ratkaisujen pohjaksi metsähaketerминаalien sijoittamiseen.

Haluan kiittää pro graduni ohjaajia FT Timo Kumpulaa ja professori Markku Tykkyläistä. Kiitos Päijät-Hämeen liiton Veera Lehdolle, Tapio Ojaselle ja Riitta Väänäselle. Kiitos myös Euroopan metsäinstituutin Michael den Herderille ja kaikille muille, jotka ovat tutkielman eri vaiheissa kommentoineet.

## 1 Johdanto

Euroopan unioni on asettanut vuodelle 2020 tavoitteet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi vuonna 2008 tehdyssä ilmasto- ja energiapaketissa. Suomessa on nostettava uusiutuvan energian käyttö 38 prosenttiin energian loppukulutuksesta vuoteen 2020 mennessä. Metsähakkeen käytöllä on merkittävä rooli tavoitteiden saavuttamisessa. Uusiutuvan energian velvoitepaketin myötä metsähakkeen käytön tavoitteena on 13,5 miljoonaa kiintokuutiometriä vuonna 2020 sähkön- ja lämmön tuotannossa, mikä vastaa noin 25 Terawattituntia (TWh) (Työ- ja elinkeinoministeriö 2013: 68). Ylitalon (2012: 3) mukaan vuonna 2011 metsähaketta käytettiin 7,5 miljoonaa kiintokuutiometriä eli noin 15 TWh:n edestä. Metsähakkeen käytössä on tapahtunut tasaisesti nopeaa kasvua 2000 -luvun aikana, sillä vuonna 2000 metsähakkeen kokonaiskäyttö oli noin miljoona kiintokuutiometriä ja vuonna 2008 neljä miljoonaa kuutiometriä. Metsähakkeen käytön lukemiin otetaan huomioon lämpö- ja voimalaitosten lisäksi lämmitys pientaloissa. Tavoitteeseen on kuitenkin vielä paljon matkaa, noin kuusi miljoonaa kuutiometriä, eli käytön lisäyksen tulisi hieman kasvaa seuraavan seitsemän vuoden aikana.

Ojanen (2012: 11–19) toteaa Päijät-Hämeen ilmasto- ja energiaohjelman mukaisten päästövähennystavoitteiden olevan 70 prosenttia vuoden 2008 tasosta vuoteen 2035. Tavoitteeseen pyritään vähentämällä tasaisesti päästöjä 15 prosenttia viiden vuoden välein. Päijät-Hämeen liiton metsäenergian tuotannon lisäämisen tavoitteet ovat yksi osa päästöjen vähentämisessä. Metsäenergian tuotantoa pyritään lisäämään vajaasta 1500 gigawattitunnin käytöstä 350 gigawattitunnilla vuoteen 2035 mennessä. Tavoite on varsin maltillinen kansallisiin tavoitteisiin nähden. Metsähakkeen tuotannon teoreettinen lisäämispotentiaali alueella on huomattavasti ilmasto- ja energiaohjelman tavoitetta suurempi (Laitila ym. 2008; Anttila ym. 2009). Metsähakkeen käytön lisäyksen mahdollisuuksista on kuitenkin varsin ristiriitaista tietoa johtuen useista erilaisista muuttujista, joita tulee arvioida mietittäessä kuinka paljon metsähakkeen käyttöä on mahdollista lisätä tietyllä alueella.

Metsähakkeen tuotantoon on kehitetty useita tuotantotapoja, mikä johtuu osaksi hakkeen raaka-aineen eri ominaisuuksista, jotka asettavat erilaisia vaatimuksia tuotantotapoihin. Metsähakkeen käyttö on koko ajan kasvamassa ympäri Suomea, mikä antaa haasteen metsähakkeen toimittamiseen kasvavan kysynnän tarpeisiin ja tuotantoketjun oikeaan

valintaan (Lähdevaara ym. 2010: 12). Kasvava kysyntä ja tuotannon lisääminen vaikuttavat väistämättä logistiikkaan. Metsähakkeen tuotannossa suurin paine kohdistuu tieliikenteeseen, jatkossa yhä enemmän myös raideliikenteeseen. Tuotantotapojen kestävyysvaikutusten arvioinnilla voidaan selvittää materiaalivirtojen vaikutuksia ekologisesta, sosiaalisesta ja taloudellisesta näkökulmasta. Tiedon lisääminen tuotannon riskeistä ja mahdollisuuksista luo mahdollisuuksia lisätä metsähakkeen hyödyntämistä kestävän kehityksen periaatteiden mukaisesti.

## 2 Tutkimusongelma ja tutkimuskysymykset

Tämän pro gradu -tutkielman tarkoituksena on selvittää metsähakkeen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutuksia. Tutkimusongelman voi kiteyttää kysymykseen: miten metsähakkeen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutukset muuttuvat tuotannon lisääminen johdosta käytetyillä tuotantotavoilla? Kiinnostuksen kohteena ovat logistiikan taloudelliset, ekologiset ja sosiaaliset kestävyysvaikutukset. Tarkastelua tehdään vertailemalla kahta yleisintä tuotantotapaa eli tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotantoketjua. Tutkimusalue rajautuu Päijät-Hämeeseen sekä metsähakkeen käytön että korjuun osalta. Alueen ulkopuolelle suuntautuville materiaalivirroille ei tehdä mallinnusta kestävyysvaikutusten arvioinnissa.

Tutkimusongelmaa tarkentavat tutkimuskysymykset ovat:

1. Miten metsähakkeen tuotannon lisääminen vaikuttaa logistiikan kestävyYTEEN?
2. Miten metsähaketerminaalit vaikuttavat tuotannon logistiikan kestävyYTEEN?
3. Mille alueille kohdistuu suurin kuormitus metsähakkeen tuotannon johdosta?

Tutkielmassa käsitellään aluksi aihepiiriin liittyvät oleelliset käsitteet ja teoreettiset lähtökohdat. Metsähakkeen tuotantoa lähestytään systeemiteoreettisesta lähtökohdasta, missä optimoidaan materiaalivirtaa suhteessa kestäväan kehitykseen. Teoreettisen viitekehyksen jälkeen esitellään käytetyt tutkimusaineistot ja tutkimusmenetelmät. Aineistona on käytetty asiantuntijahaastatteluja, paikkatietoaineistoja ja tilastoista sekä artikkeleista saatuja tietoja. Asiantuntijahaastatteluita on käytetty optimaalisen terminaaliverkoston määrittämiseen sekä Päijät-Hämeen alueellisten erityispiirteiden tietojen saamiseksi metsähakkeen tuotannossa. Paikkatietoaineistoja käytetään optimaalisen kaukokuljetusketjun rakentamiseksi tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotantoketjuissa sekä kestävyysvaikutusten arviointiin eri menetelmillä. Tilastoja ja artikkeleista saatuja tietoja käytetään tuotantoketjujen kestävyysvaikutusten mallintamiseen ToSIA:lla (A Tool for Sustainability Impact Assessment). Tutkielman tuloksia käsitellään teoreettisen viitekehyksen pohjalta, ja pohdinnassa arvioidaan tutkimuskysymysten avulla saatujen tulosten alueellista merkitsevyyttä. Viimeisenä osiona ovat tutkielman johtopäätökset.



### **3 Kestävä metsähakkeen tuotanto**

#### **3.1 Mitä on metsäenergia?**

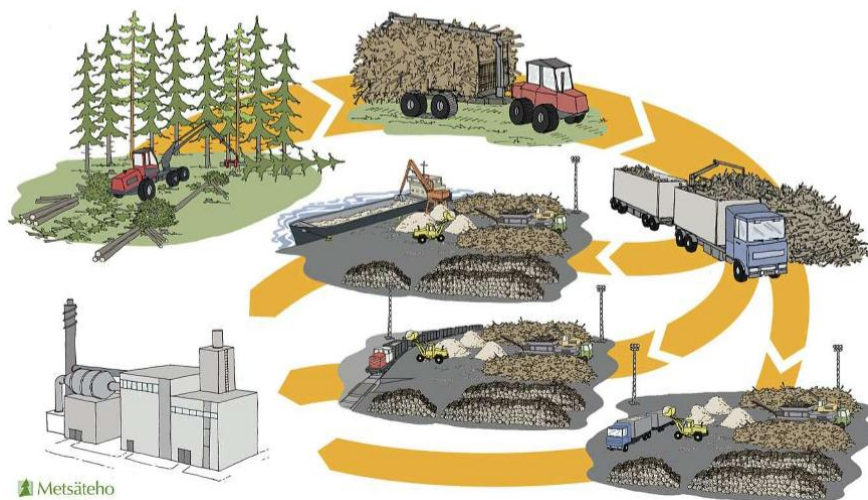
Antikainen ym. (2007: 11) määrittää bioenergian tarkoittavan biopolttoaineilla tuotettua käyttöenergiaa. Biopolttoaine on biomassasta eli eloperäisestä massasta tuotettua polttoainetta. Suomessa yleisin bioenergian hyödyntämismuoto on metsäbiomassasta saatava bioenergia, jota myös metsähake on. Metsähakkeen lisäksi metsäenergiajakeita syntyy metsäteollisuuden puunkäytön tuotannossa. Näistä merkittävimpiä ovat mustalipeä, puunkuori ja sahanpuru (Energiateollisuus ry 2013).

Metsähaketta käytetään energiantuotannossa sekä lämpö- ja voimalaitoksissa että pientaloissa. Koisti (2011: 11–13) toteaa metsähakkeen raaka-aineena koostuvan pääasiassa kolmesta eri aineksesta: hakkuutähdepuusta, kannoista sekä nuorten metsien hoidon yhteydessä kertyvästä pienpuusta. Pienpuuta ovat runkopuut, jotka eivät kokonsa puolesta riitä metsäteollisuuden ainespuuksi. Pienpuu voi olla joko rankaa tai haketus voidaan suorittaa oksineen. Hakkuutähdepuuta ovat avohakkuualueilta kerätyt oksat ja puulatvukset. Eniten hakkuutähteitä kertyy kuusen avohakkuualueilta. Kannot kerätään päätehakkuun alueilta. Metsähakkeeksi voidaan käyttää myös järeeä runkopuuta, mikäli se ei kelpaa teollisuuden raaka-aineeksi esimerkiksi lahovikaisuuden vuoksi. Varsinainen hake on edellä mainituista materiaaleista pilkottu tai murskattu pienirakenteinen pala (Lähdevaara ym. 2010: 33).

#### **3.2 Metsähakkeen tuotantoketjujen logistiikka**

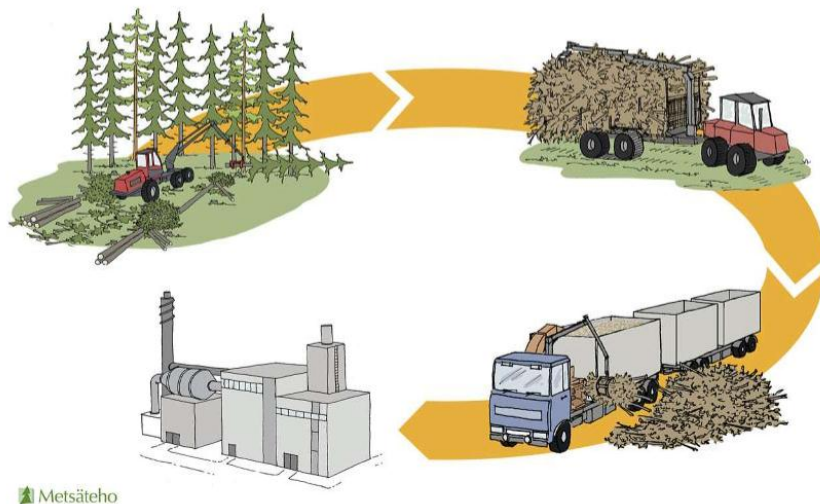
Logistiikalla tarkoitetaan materiaalivirtaan liittyviä muunnoksia ja materiaalivirran kiertoon liittyviä toimintoja, joita ovat materiaalien toimittaminen, jakelu ja liikennetoiminnot, tukku- ja jälleenmyynti sekä näihin liittyvä informaatiovirta (Hesse & Rodrique 2004: 172). Kestävään logistiikkaan vaikuttavat eniten materiaalin hankkijat, valmistajat, kuluttajat, logistiikkaoperaattorit, ylläpitäjät ja lopputuotteen kierrätys ja energiantuotanto (Quariguasi Frota Neto ym. 2008). Metsähakkeen tuotannossa on useita eri vaihtoehtoja tuotannon logistiikalle. Laitilan ym. (2010) mukaan metsähakkeen tuotantoketju rakentuu pitkälti hakettamisen sijoittumisen ja materiaalin kuljetusmuodon mukaan. Metsähaketta voidaan

tuottaa keskitetyllä tai hajautetulla tuotantomallilla. Keskitetyssä mallista käytetään nimitystä terminaalihaketus tai käyttöpaikkahaketus. Näissä energiapuu kuljetetaan tienvarressa varastoinnin jälkeen terminaaliin tai käyttöpaikalle, jossa haketus tapahtuu. Kuvassa 1 on esimerkki terminaalihaketuksen tuotantoketjusta. Tuotantomenetelmällä päästään eroon "kuumasta ketjusta", jolloin kaikissa työvaiheissa voidaan käyttää kalustoa niin tehokkaasti kuin mahdollista ilman odotusaikoja. Toisaalta tuotantoketjun heikkoutena on se, että kuormakoko jää pienemmäksi käsittelemättömällä puumassalla. Tämä kasvattaa kustannuksia kaukokuljetuksen osalta.



**Kuva 1.** Terminaalihaketuksen tuotantoketju (Kärhä 2008: 7).

Hajautetun tuotantoketjun menetelmiä ovat välivarastolla eli tienvarressa tai palstalla tapahtuva haketus. Välivarastolla materiaali haketetaan suoraan vieressä odottavaan hakeauton. Tämän jälkeen hake kuljetetaan käyttökohteelle. Tienvarsihaketuksessa hakeauton ja hakkurin toiminnot kytkeytyvät kiinteästi toisiinsa. Tästä johtuen toimintoja ei voi limittää, mikä aiheuttaa odotusaikoja joko hakkurille tai hakeautolle (Laitila ym. 2010: 37). Kuvassa 2 on esimerkki hajautetusta tuotantomenetelmästä.



**Kuva 2.** Tiensivähäketuksen tuotantoketju (Kärhä 2008: 6).

Strandströmin (2012) mukaan metsähakkeen tuotantoketjuista selvästi yleisin on tiensivähäketus noin 60 prosentin osuudella vuonna 2011. Terminaalihäketuksen tuotantoketju on toisena 21 prosentilla. Kärhä (2009) informoi terminaalihäketuksen tuotantoketjun olevan yleistymässä ja sen käytön uskotaan yleistyvän myös tulevaisuudessa. Strandström (2012) toteaa sen sijaan käyttöpaikkahäketuksen käytön puolittuneen kahdessa vuodessa: vuonna 2011 sen osuus oli 18 prosenttia. Palstahäketusta ei käytetä enää laajamittaisesti Suomessa. Tässä tutkielmassa tarkastellaan nimenomaan hajautetun ja keskitetyn tuotantomallin eroavaisuuksia kahden käytetyimmän tuotantoketjun eli terminaalihäketuksen ja tiensivähäketuksen osalta.

### 3.2.1 Metsähäketeterminaali terminaalihäketuksen tuotantoketjussa

Impola (2011: 3) määrittää metsähäketeterminaalin tarkoittavan metsähakkeen tuotannossa metsäenergian raaka-aineiden keskitettyä varastoaluetta, valmiiden polttoaineiden varastoaluetta voimalaitosalueella tai muualla, polttoaineiden valmistus- ja varastointialuetta. Se on lisäksi osa voimalaitokselle toimitettavien polttoaineiden tuotanto- ja logistiikkaketjua. Terminaalin aiheuttamat lisäkustannukset tuotanto- ja toimitusketjussa voidaan kompensoida muun muassa parantamalla polttoaineen laatua terminaalien sisäisten toimintojen avulla.

Kuntien alueiden käytön suunnittelulla on merkittävä osuus bioenergian hyödyntämisen liiketoiminnassa erityisesti maakuntakaavoituksen, yleiskaavoituksen ja asemakaavoituksen

näkökulmasta (Perälä ym. 2011: 23–25). Hyvin sijoitettu terminaali voi muodostaa synergiaetuja toisten laitosten kanssa, jolloin se ei olisi pelkkä raaka-aineen varasto (Seppänen 2011: 10). On hyödyllistä selvittää esimerkiksi maa-ainesten vastaanoton ja jätteenkäsittelyn sijoittamista metsähaketerminaalin yhteyteen mahdollisten synergiaetujen löytämisen takia.

Perälän ym. (2011) mukaan terminaaliverkostolla tarkoitetaan tarpeenmukaista määrää terminaaleja, joista osa on kaikkia palveluja tarjoavia terminaaleja ja loput alemmanasteisia terminaaleja. Perälä ym. (2011) ja Seppänen (2011) toteavat bioenergian lisääntyvän käytön johtavan keskitettyjen ja suurempien terminaalien käyttöön. Myös rautateiden käytön ennakoidaan kasvavan tulevaisuudessa metsäenergian tuotannossa. Näin ollen rautatiet tulisi huomioida terminaalien sijaintia suunniteltaessa. Metsäenergian tuotannon muuttuva tilanne on perusteltua huomioida Päijät-Hämeen metsäenergian tuotannon logistiikan ohjaamisen suunnittelussa.

### **3.2.2 Metsähaketerminaalin sijainnin suunnittelu**

Metsähaketerminaalit ovat raskaiden moottoriajoneuvojen liikenteen solmukohtia. Hankinta-alueen tieverkon suunnittelu on näin ollen tärkeää. Ympäristötavoitteet tulee ottaa huomioon terminaalia suunniteltaessa. Oleellista on varmistaa, ettei pohjaveteen pääse haitallisia aineita (Perälä ym. 2011: 23–25). Ympäristötavoitteiden lisäksi metsähaketerminaalin sijainnin suunnittelussa tulee ottaa huomioon sosiaaliset ja taloudelliset näkökulmat.

Perälä ym. (2011: 23–25) toteaa Keski-Suomen alueella terminaalien olevan yleensä pieniä, lämpölaitoksen yhteydessä ja sen omistuksessa olevia terminaaleja. Terminaaleja määritettäessä täytyy varmistaa terminaalin hyvä sijainti asiakkaisiin nähden, liikenteellinen toimivuus ja ympäristöllinen sopivuus. Optimoimalla metsähaketerminaalin sijaintia voidaan parantaa monella tavalla tuotannon logistiikan kestävyyttä. Tulevaisuuden kehitys on syytä ottaa huomioon perustaessa terminaalia esimerkkinä biopolttoaineiden mahdollinen valmistus alueella.

Päijät-Hämeen alueelta on tehty selvitys sopivien terminaalien sijainneista haastatteleamalla kuntien ja maakuntaliiton maankäytön suunnittelusta vastaavia henkilöitä. Mahdollisten

isojen terminaalien sijaintipaikkojen luku on päätynyt kymmeneen (WSP Finland Oy 2012a). Tämän perusteella valikoitiin sidosryhmän kanssa soveltuvien terminaali materiaalin käsittelyyn, joka on Viljaniemen liittymän ympäristö valtatiellä 4 Orimattilassa (WSP Finland Oy 2012b).

Pohjois-Karjalassa on tehty selvitystä mahdollisten terminaalien sijainneista etsimällä soveltuvia ja olemassa olevia sora- ja asfalttikenttiä peruskartta-aineiston avulla (Väkeväinen 2010: 4–17). Tämän lisäksi on haastateltu kuntien maankäytön toimijoita ja yritysten edustajia. Soranottoaikoista löytyisi myös mahdollisia terminaaleiksi muutettavia paikkoja. Näiden hyödyntäminen vaatii kuitenkin tapauskohtaista selvitystä muun muassa pohjavesialueista. Alla on koottuna metsähaketerminaalien sijoitteluun vaikuttavia tekijöitä Väkeväisen (2010), Perälän ym. (2011) ja Leppäsen (2012) ja selvityksien perusteella.

- *Logistiset yhteydet terminaalille ja terminaalilta käyttökohteelle. Alkuvaiheessa tärkein kuljetusmuoto on maantiekuljetus, tulevaisuuden tarpeita ajatellen on hyvä huomioida myös vesi- ja rautatieyhteys*
- *Nykyinen kaavatilanne ja mahdolliset kaavoitettavat toiminnot*
- *Alueen sähkö- ja vesiliittymät, kaasuputkiverkosto*
- *Maanomistus*
- *Liiketoimien ekologia*
- *Terminaalikentän pinta-ala on vähintään 2000-3000m<sup>2</sup>*
- *Terminaalikenttä on mieluiten jo asfaltoitava tai helposti asfaltoitavissa*
- *Haketuksessa syntyvän melun ja pölyn vuoksi terminaali ei voi olla asutuksen välittömässä läheisyydessä*
- *Maaperä ja rakennettavuus. Asfaltointi edellytetään vain polttoainekasojen pohjalle ja ajoteille. Muut alueet voivat tarvittaessa olla maapohjaisia*
- *Pohjavesialueen asettamat vaatimukset tulee huomioida terminaalipaikan sijaintia suunniteltaessa*
- *Alueella sijaitsevat hukkalämpökohteet voidaan hyödyntää polttoaineen kuivauksessa*
- *Terminaali ei tarvitse minkäänlaisia rakenteita ympärilleen*
- *Asfaltointi tehdään niin, että valumavedet pääsevät alueelta pois eikä polttoaine homehdu*

### 3.3 Kestävyys metsähakkeen tuotannossa

YK:n Brundtlandin komissio on tehnyt määritelmän kestävällä kehitykselle: kestävässä kehityksessä pyritään turvaamaan tuleville sukupolville hyvät elämisen mahdollisuudet (Brundtland 1987). Tällä pyritään estämään liiallinen luonnonvarojen hyödyntäminen. Kestävän kehityksen huomioon ottaminen tarkoittaa sitä, että päätöksenteossa tulee tarkastella ympäristöä, ihmisiä ja taloudellista näkökulmaa. Reilussa kahdessakymmenessä vuodessa kestävä kehitys mukainen politiikka on kehittynyt monipuoliseksi järjestelmäksi, jossa ovat mukana niin valtiot ja kunnat kuin kansainväliset toimijatkin. (Ympäristöministeriö 2013).

Ympäristöministeriön (2013) mukaan ekologisen kestävyuden perusehtona on biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemien säilyminen. Ekologisessa kestävyudessa tärkeä osa-alue on varovaisuusperiaatteen noudattaminen. Tämä tarkoittaa, että ympäristön tilan heikkenemistä estävien toimien lykkäämistä ei voi perustella tieteellisen näytön puuttumisella vaan ennen toimiin ryhtymistä arvioidaan riskit, haitat ja kustannukset. Metsän käytön näkökulmasta ekologiseen kestävyuteen pyritään erityisesti metsien ja vesistöjen monimuotoisuuden ylläpitämisellä (Äijälä ym. 2010: 5–6).

Ympäristöministeriö (2013) määrittää taloudellisen kestävyuden tarkoittavan pitkäjänteistä ja tasapainoista kasvua, joka ei perustu velkaantumiseen tai varantojen häviämiseen. Kestävällä pohjalla olevan talouden avulla voidaan varautua tulevaisuuden menoihin. Äijälän ym. (2010: 6) mukaan taloudellisesti kestävällä metsän hoitamisella ja käytöllä tarkoitetaan metsien elinvoimaisuuden, uusiutumiskyvyn ja tuottavuuden säilyttämistä. Puuntuotannossa tavoitellaan kullekin kohteelle toimenpidemalli, jolla pyritään maksimoimaan nykyarvon nettotulo.

Sosiaalisessa kestävyudessa keskiössä on hyvinvoinnin siirtäminen sukupolvelta toiselle (Ympäristöministeriö 2013). Metsätalouden näkökulmasta sosiaalisella kestävyydellä tarkoitetaan metsätyöntekijöiden ja metsäyrittäjien toimeentuloa, työoloa, työkyvystä huolehtimista, metsien monikäyttöä sekä virkistysmahdollisuuksia (Äijälä ym. 2010: 6). Kaikki kestävyuden osa-alueet kytkeytyvät toisiinsa, joten kestävyysvaikutuksia mietittäessä tulee ottaa huomioon kokonaisvaltainen kestävyysvaikutuksien arviointi.

Metsähakkeen käytön lisääminen asettaa haasteita kestävän kehityksen mukaiseen toimintatapaan. Antikaisen ym. (2007) mukaan bioenergian tuotannon lähtökohta on, että ekologinen, taloudellinen ja sosiaalinen kestävyys huomioidaan. Toisena lähtökohtana hän toteaa, että bioenergiaa pitää käsitellä yhdessä energiajärjestelmän kokonaisuutena, eli bioenergiatuotanto on vain osa kestävämpää energiajärjestelmää. Kolmantena näkökulmana Antikainen kertoo, että bioenergiakehityksen pitää tukea muita energiantuotannon järjestelmiä, jotta bioenergian hyödyntämisen kokonaishaitat eivät ole kokonaishyötyjä suurempia. Bioenergian tuotannon tulee myös edistää kestävyyttä eri alue- ja aikatasoilla globaalista paikalliseen ja nykyhetkestä tulevaisuuteen.

## 4 Metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten arviointi

### 4.1 Systeemi materiaalivirta-analyysin lähtökohtana

Systeemiajattelutapa ei ole uusi tieteessä, esimerkiksi Newtonin painovoimalaki tarkastelee aurinkokuntaa systeemin näkökulmasta. Systeemiaanalyysit omaksuttiin biomaantieteeseen, klimatologiaan, maaperämaantieteeseen geomorfologiaan vuosien 1935–1971 aikana ja systeemiajattelu on nähty myös linkkinä ihmis- ja luonnonmaantieteen välillä (Gregory 2000).

Bennetin & Chorleyn (1978) mukaan systeemi käsittää materiaalivirran syöttöarvon (input) muutosta tiettyyn ulostuloon (output). Alasysteemit ja prosessit voidaan tunnistaa materiaalivirran ja energian muuntajana, mitkä muodostavat materiaalkiertoja ja materiaalivirtoja systeemin lävitse. Hugget (1980) määrittää systeemin koostuvan elementeistä ja elementtien välisistä suhteista. Elementit voivat vaihdella fyysisistä objekteista abstrakteihin käsitteisiin.

Materiaali ja energiavirta pohjautuvat systeemeissä kahteen fysiikan pääsääntöön (Georgescu-Roegen 1976; Ayres 1998). Georgescu-Roegen (1976) kirjoittaa sääntöjen olevan: energian ja materiaalin määrä universumissa on vakio. Materiaali ei häviä vaan muuttaa ainoastaan muotoaan tuotantoketjun prosessien välillä eli prosessin syöttöarvo ainesmääränä on sama kuin ulostulo. Toisena näkökulmana on, että suljetussa systeemissä materiaali ja energia muuntuvat palautumattomasti yhteen suuntaan kohti entropian maksimia määritetyn materiaalivirran mukaisesti. Georgescu-Roegen sovelsi näin termodynamiikan ensimmäistä ja toista pääsääntöä talouden materiaalivirtoihin. Nämä perussäännöt ovat myös metsähakkeen materiaalivirta-analyysin lähtökohtina.

Chorleyn & Kennedyn (1971) mukaan systeemit voidaan luokitella toiminnallisten kriteerien perusteella tai systeemin monimutkaisuuden perusteella. Toiminnallisuuden perusteella luokat ovat eristetty, suljettu ja avoin systeemi. Avoin systeemi voi vaihtaa materiaa, informaatiota ja energiaa ympäristöönsä nähden. Suljettu systeemi voi vaihtaa vain energiaa ja eristetty ei kumpaakaan. Käytännössä lähes kaikkia systeemejä voidaan pitää avoimina, koska ne ovat osa suurempaa järjestelmää. Systeemit voidaan luokitella neljään



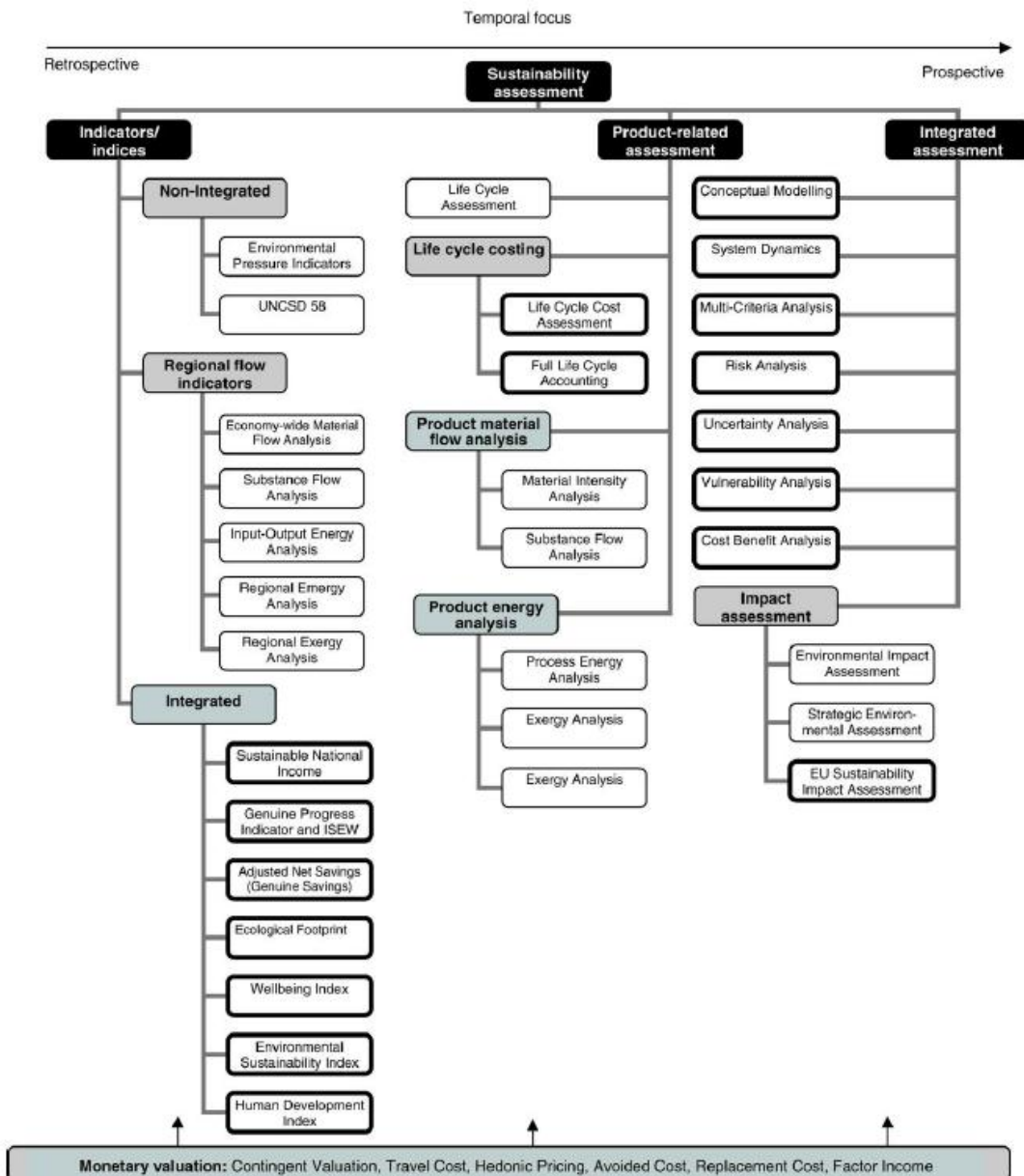
pääkategoriaan systeemin monimutkaisuuden mukaan: morfologisiin systeemeihin, tapahtumasarjasysteemeihin, prosessi-vastakaiku systeemeihin ja kontrolloituihin systeemeihin. Nämä kuvaavat systeemejä yksinkertaisemmassa mallissa, missä vuorovaikutussuhteita systeemien komponenttien välillä voidaan havaita.

Tapahtumasarjasysteemin komponentit ovat linkittyneitä materiaalin ja energiavirran avulla, missä prosessin ulostulo on toisen prosessin lähtöarvo (Chorley & Kennedy 1971). Okkonen (2009) määrittää teollisuuden tuotantosysteemien olevan tyypillisiä tapahtumasarjasysteemejä, missä materiaalivirta liikkuu prosesseista toiseen aina energian kulutukseen asti. Systeemianalyysi tarjoaa moniulotteisen lähestymistavan, jossa tietoa eri tieteenaloilta ja alueilta voidaan yhdistää (Clayton & Radcliffe 1997). Systeemianalyyseissä pyrkimyksenä on yksinkertaistaa monimutkaista ympäristöä laskettavampaan muotoon, joka toimii hyvin esimerkiksi mallinnettaessa kestävyysvaikutuksia. Myös moniulotteinen lähestymistapa toimii hyvin tutkimuksessa, jossa käytetään useita eri menetelmiä ja aineistoa on hyvin erilaisista lähteistä.

#### **4.2 Metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten arviointi**

Bioenergian tuotannon kestävyden arviointi on käytännössä vaikeaa, koska tuotannossa on paljon muuttuvia tekijöitä metsähakkeen erilaisten tuotantoketjujen myötä. Tuotannon kestävyttä on mahdollista arvioida kestävyttä arvioivien indikaattoreiden avulla. Sopivien indikaattorien ja vertailukohteiden luominen on kuitenkin haastavaa, koska niiden tarvitsee olla yksityiskohtaisia kuvataksaan kestävyden vaikutuksia bioenergian tuotannossa (Food and Agriculture Organization of the United Nations 2010: 71). Tieteellisin kriteerein arvioituna indikaattoreiden tulee olla päteviä ja arvioinnin tulosten luotettavia.

Ness ym. (2006) määrittää kestävyden arvioinnin kolmeen eri kategoriaan. Kestävyden arviointia voidaan tehdä indikaattoreiden ja indeksien avulla, tuotelähtöisesti tai yhdistetyin arviointityökaluin. Indikaattoreiden ja indeksien avulla voidaan arvioida kestävyttä erityisesti ajan funktiona. Kolmen kategorian lisäksi on olemassa päällekkäinen kategoria rahallisesta arvioinnista, jota voidaan käyttää osana edellä mainittuja kolmea eri kategoriaa.



**Kuva 3.** Kestävyyden arvioinnin työkalujen kolme pääkategoriaa Nessin ym. (2006) mukaan. Ensimmäisellä kategoriolla tarkoitetaan indikaattoreita ja indeksejä, toisella kategoriolla tarkoitetaan tuotelähtöistä arviointia kestävyudessa, kolmas kategoria kuvaa päätöksenteon tueksi kehitettyjä työkaluja. Nämä kategoriat on kuvattuna yllä olevassa kuvassa vasemmalta oikealle.

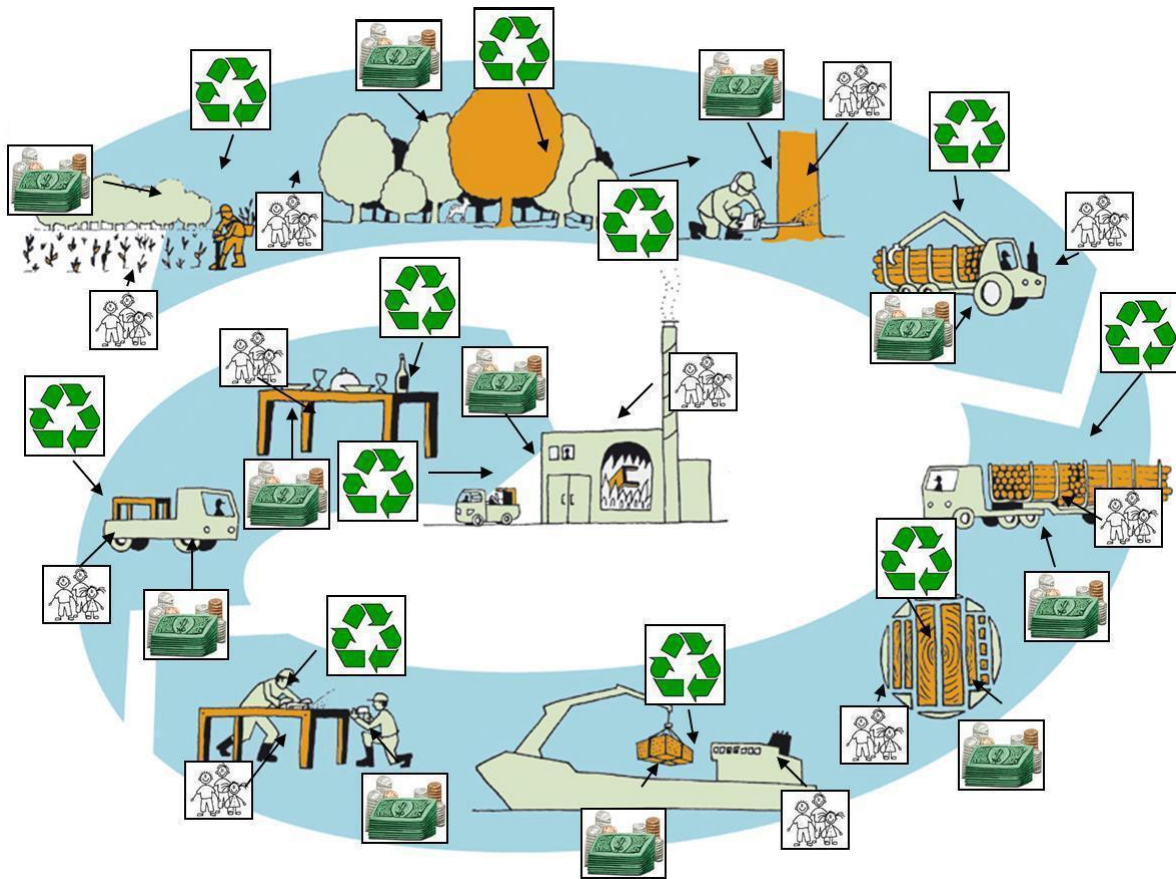
Nessin ym. (2006: 498–499) mukaan ensimmäisessä kategoriassa arviointi perustuu indikaattoreihin ja indekseihin. Nämä ovat yleensä kvantitatiivisia ja kuvaavat yleensä taloudellista, sosiaalista tai ympäristön kehitystä tietyllä alueella. Kestävyyden tarkastelu tapahtuu menneisyyden näkökulmasta, millä pyritään luomaan käsityksiä kehityssuunnista. Toisessa kategoriassa arvioidaan kestävyyttä tuotelähtöisesti. Se keskittyy tuotteiden ja kulutuksen materiaalivirran selvitykseen. Erona ensimmäiseen kategoriaan on alueellisen lähtökohdan sijaan tuotteisiin keskittyminen (kuva 3). Kategorian työkalut sallivat sekä

menneen ajan että tulevaisuuden tarkastelun. Arvioinnissa keskitytään pääasiassa ekologiseen näkökulmaan, mitkä saattavat sisältää myös taloudellisen kestävyuden näkökulman. Tuotelähtöisiä arviointitapoja on esimerkiksi elinkaariarviointi.

Kolmannessa kategoriassa ovat päätöksenteon tueksi kehitetyt työkalut, mihin myös ToSIA-työkalu kuuluu. Ness ym. (2006) kirjoittaa kolmannen ryhmän arviointimenetelmän sopivan poliittisten päätöksenteon tueksi tai määritetyllä alueella tiettyyn projektiin liittyen. Projektiin liittyvät työkalut ovat yleisesti paikalliseen tasoon liittyviä ja poliittisen päätöksenteon tueksi kehitetyt työkalut puolestaan paikallisesta globaaliin tasoon. Työkalut toimivat tulevaisuuden arvioinnissa ja niihin on yleensä kehitetty tulevaisuuden skenaario, jonka vaikutuksia halutaan tarkastella. Tähän kategoriaan on kehitetty monia eri analysointimenetelmiä kuten riskianalyysit ja haavoittuvuusanalyysit.

### **4.3 ToSIA-työkalu kestävyysvaikutusten arvioinnissa**

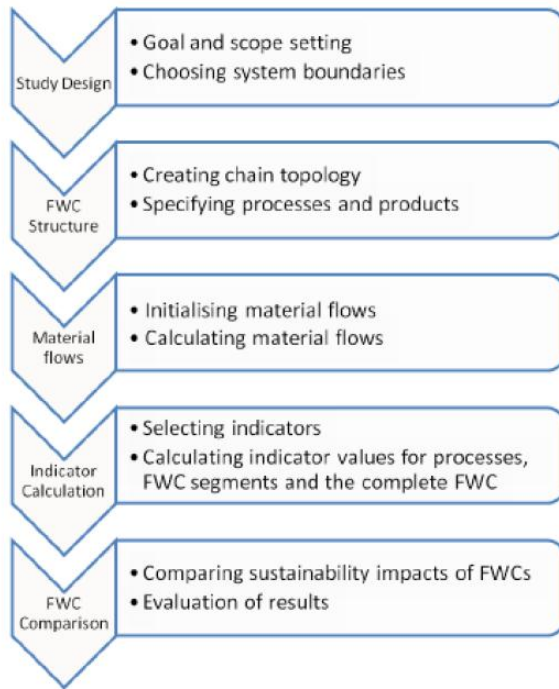
Tässä tutkimuksessa käytetty työkalu kestävyysvaikutusten mallintamiseen on alun perin EFERWOOD -projektissa ja sittemmin Northern ToSIA-projektissa kehitetty ToSIA-työkalu, jolla voidaan arvioida tuotantoketjun aiheuttamia kestävyysvaikutuksia (European Forest Institute 2013). ToSIA:lla voidaan arvioida kestävä metsänkäyttöä ekologisesta, taloudellisesta ja sosiaalisesta näkökulmasta. Tarkastelun lähtökohtana on metsäpuutuoteketju (Forestry Wood Chain, FWC), jonka avulla kestävyyttä arvioidaan ketjussa olevien prosessien kautta (Lindner ym. 2009). Kuvassa 4 on esimerkki metsäpuutuoteketjusta ja siihen liittyvistä kestävyysnäkökulmista. ToSIA-työkalulla voidaan tuottaa monipuolisesti tietoa kestävyysvaikutuksista päätöksentekoon tulevaisuuden eri skenaarioilla tarkasteltuna.



**Kuva 4.** ToSIA:n metsä-puutuoteketju ja prosesseja, jotka liittyvät tuotantoketjuun. Kuvassa ilmenee prosesseihin liittyviä indikaattoreita, jotka kuvaavat ekologista, sosiaalista tai taloudellista kestävyyttä (Lindner ym. 2009).

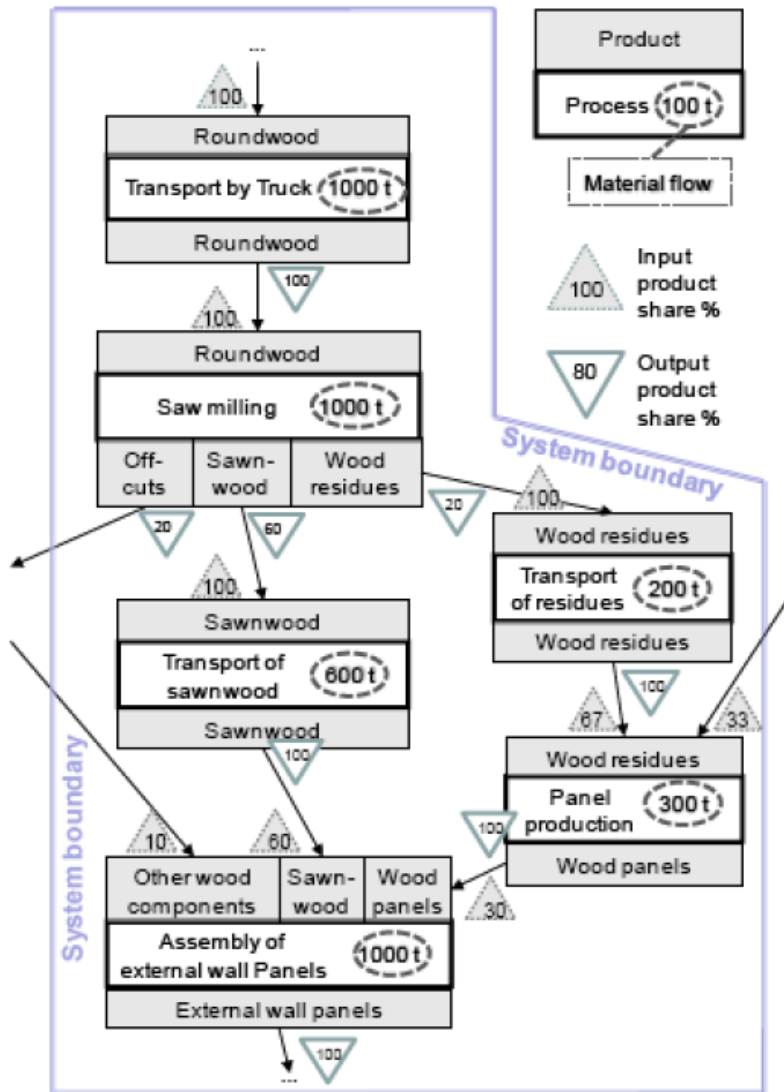
#### 4.3.1 Materiaalivirran laskeminen

Ensimmäisenä vaiheena Lindnerin ym. (2009) mukaan kestävyysvaikutusten ToSIA-arvioinnissa on tavoitteiden asettaminen ja tutkimuksen laajuuden määrittäminen eli määritetään systeemin rajat käytettävässä metsä-puutuoteketjussa, minkä avulla täsmennetään sijainti, rakenne sisältö ja metsä-puutuoteketjun tarkkuus (kuva 5). Tämän jälkeen määritetään ketjun topologia, jossa määritetään kaikki prosessit. Metsähakkeen tuotannossa prosesseja ovat esimerkiksi haketus tai kaukokuljetus. Prosessien välissä materiaali ja energia muutetaan linkittymään seuraavaan prosessiin sopivaksi. Prosessit linkittyvät yhteen tuotteisiin liittyvien mitattavien suureiden avulla, metsähakkeen tuotannon laskennassa tuotteena on metsähakkeen määrä. Prosessit vastaanottavat ja luovuttavat tuotteita; ainoastaan ketjun ensimmäisessä prosessissa ei vastaanoteta tuotetta edellisestä prosessista, vaan sen alkuarvo on määritettävä kyseiseen prosessiin, jotta laskentaa voidaan tehdä. ToSIA:ssa prosessit voivat vastaanottaa tuotteita myös ketjun rajojen ulkopuolelta.



**kuva 5.** ToSIA-menetelmän kestävyysvaikutusten arvioinnin määrittämisen vaiheet kestävyysvaikutusten vertailuun asti (Lindner ym. 2010: 2199).

Kun prosessit on määritetty, alustetaan materiaalivirta ja lasketaan materiaalivirran toimivuus. Tämän jälkeen valitaan tutkimuksessa käytettävät indikaattorit ja lasketaan indikaattoriarvot prosesseille. Viimeisessä vaiheessa vertaillaan metsä-puutuoteketjujen kestävyysvaikutuksia, jos halutaan vertailla useita ketjuja keskenään. ToSIA:ssa prosessit on jaettu neljään osaan, joita ovat metsävarojen käsittely ( $FWC_{s1}$ ), metsän ja teollisuuden vuorovaikutteisuus ( $FWC_{s2}$ ), prosessointi ja valmistus ( $FWC_{s3}$ ) sekä teollisuuden ja kuluttajan vuorovaikutus ( $FWC_{s4}$ ) (Lindner ym. 2010). ToSIA:lla voidaan vertailla vain yhtä metsä-puutuoteketjua eri prosessien kokonaisuuksien avulla.

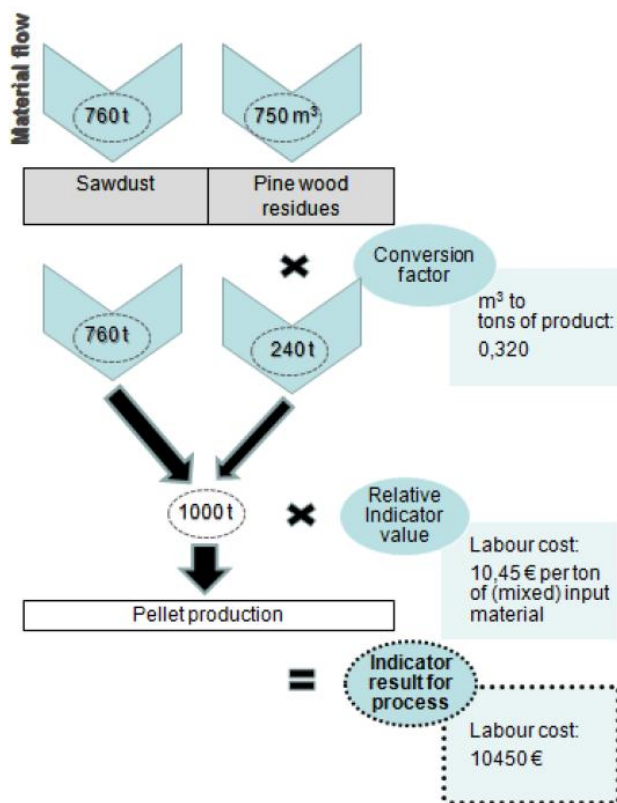


**Kuva 6.** Metsä-puutuoteketjun topologiasta on kuvattuna valitut prosessit ja näiden yhteydet toisiinsa (Lindner ym. 2009).

Prosesseissa käsiteltävän tuotteen määrä lasketaan vastaanotettavan tuotteen määrästä. Kuvassa 6 on esitettyä metsä-puutuoteketjun materiaalivirta eri prosesseihin. Vastaanotettavat tuotteet ovat välttämättömiä materiaalivirran laskemisessa, sillä ketju ei toimi, jos vastaanotettavien tuotteiden määrässä on aukko. Materiaalivirran yksikkönä käytetään ToSIA:ssa kahta mittayksikköä: orgaanisen hiilen määrä puussa tonnia kohden sekä metsän ala hehtaaria kohden (Lindner ym. 2009: 8). Hiilen määrää ei käytetä  $FWC_{s1}$  osalta, koska ei ole helppoa seurata hiilen kerääntymistä. Tämän takia prosesseissa käytetään yksikkönä metsän alaa hehtaareittain puiden kaatamiseen asti eli  $FWC_{s2}$  alkuun.

### 4.3.2 Indikaattorit ToSIA:ssa

Kehityksen kestävyysvaikutusten arvioinnin edellytyksenä on käytettävien indikaattorien määrittäminen tuotantoketjulle (Lindner ym. 2009: 2). Indikaattorit ovat ToSIA:ssa sidoksissa prosessien avulla tuotantoketjuun. Edellytyksinä indikaattoriarvoille on, että arvot ovat helposti mitattavissa: esimerkkinä sosiaalista kestävyyttä mittaava työllistävyys/m<sup>3</sup>. Indikaattorit ovat suhteellisia arvoja yksikköä kohden, jotka ToSIA muuntaa muuntokertoimen avulla vastaamaan hiilitonnia (kuva 7). Jokaiselle prosessille pitää käyttää samaa indikaattorin mittausyksikköä, jotta pystytään mittaamaan vaikutuksia samalla tavalla kaikista prosesseista.



**Kuva 7.** Esimerkki työntekijäkulojen laskentatavasta harvennusprosessissa. Työntekijäkulojen yksikkönä on m<sup>3</sup>, josta lasketaan muunnoskerroimen avulla kestävyysvaikutus (Lindner ym. 2009).

Linderin ym. (2009) mukaan indikaattoreiden arvot tulisi olla samalta vuodelta, minkä avulla tarkastelusta tulee luotettavampaa ja yhtenäisempää. Spatiaalisesti indikaattoreiden rajaus ToSIA:ssa riippuu tutkimuksen tarkkuudesta. On mahdollista määrittää kolme eri tasoa spatiaaliselle indikaattorin rajaukselle: alueellisesti määritetty, metsään määritetty ja kulutukseen määritetty taso. Alueellisesti määritetyssä indikaattorit ovat sidoksissa tiettyyn

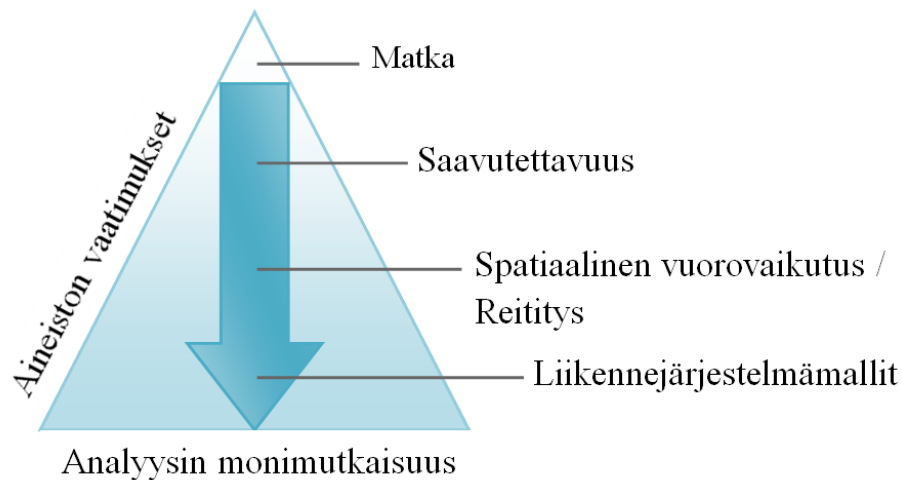
alueeseen, esimerkiksi Suomeen. Metsään rajatussa lähtökohdassa metsä sijaitsee tietyllä alueella, mutta loput indikaattorit voivat sijaita tarkastelualueen ulkopuolella. Kulutukseen määritetyissä tutkimuksessa kulutus sijaitsee maantieteellisesti kohdealueella ja osa metsävarannoista ja prosesseista ulkopuolella. Tutkimuksen rajaukseen vaikuttaa myös indikaattoreiden määritelmät. Hiilidioksidipäästöt voivat olla laskettuja tuotteen elinkaaresta, jolloin hiilidioksidipäästöt pitää liittää tuotantoketjun prosesseihin yleisemmin. Materiaalivirran avulla pystytään laskemaan useiden eri prosessien kokonaisvaikutus kestävyyttä mittaaville indikaattoreille. Tämän menetelmän avulla saadaan selville koko ketjun vaikutukset halutuilla indikaattoreilla mitattuina.

#### **4.4 Paikkatietomenetelmät metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten arvioinnissa**

Paikkatietojärjestelmien avulla voidaan analysoida paikkaan sidottua maantieteellistä aineistoa usealla eri tavalla, jolloin voidaan havainnollistaa kartalla ilmiöiden välisiä suhteita (Mitchell 2012; ESRI 2013a). Metsähakkeen tuotantotapoja tutkittaessa on mahdollista tarkastella esimerkiksi metsäenergiapotentiaalin ja metsähakkeen käyttökohteiden sijoittumista toisiinsa nähden. Paikkatietopohjaista metsäenergiamallinnusta ovat tehneet esimerkiksi Anttila ym. (2011) ja Hock ym. (2012). Paikkatiedon laajat analysointimahdollisuudet antavat hyvät edellytykset myös monipuoliseen kestävyysvaikutusten arviointiin.

Paikkatietojärjestelmien hyviä puolia ovat aineiston haku esimerkiksi tietokannasta, aineiston visualisointi, kapasiteetti analysoida laajoja aineistoja spatiaalisesti, aineiston spatiaalisten vuorovaikutusten analysointi empiiristen ja kvantitatiivisten menetelmien avulla (Chan 2011: 293). Tutkittaessa metsäenergian tuotannon kestävyysvaikutuksia nimenomaan logistiikan näkökulmasta, on otettava huomioon liikennejärjestelmät niin aineistojen kuin menetelmien osalta. Rodrigue ym. (2013) osoittaa, että liikennejärjestelmien osalta aineiston vaatimus riippuu menetelmien vaativuudesta. Mitä vaativimpia analyysyjä halutaan tehdä, sitä vaativampia ovat aineiston vaatimukset analyysissä (kuva 8). Tehtäessä monimutkaisia analyysyjä, tarvitaan yleensä myös enemmän empiiristä tietoa, mikä selittää aineiston vaatimuksen ja analyysien välistä riippuvuutta.





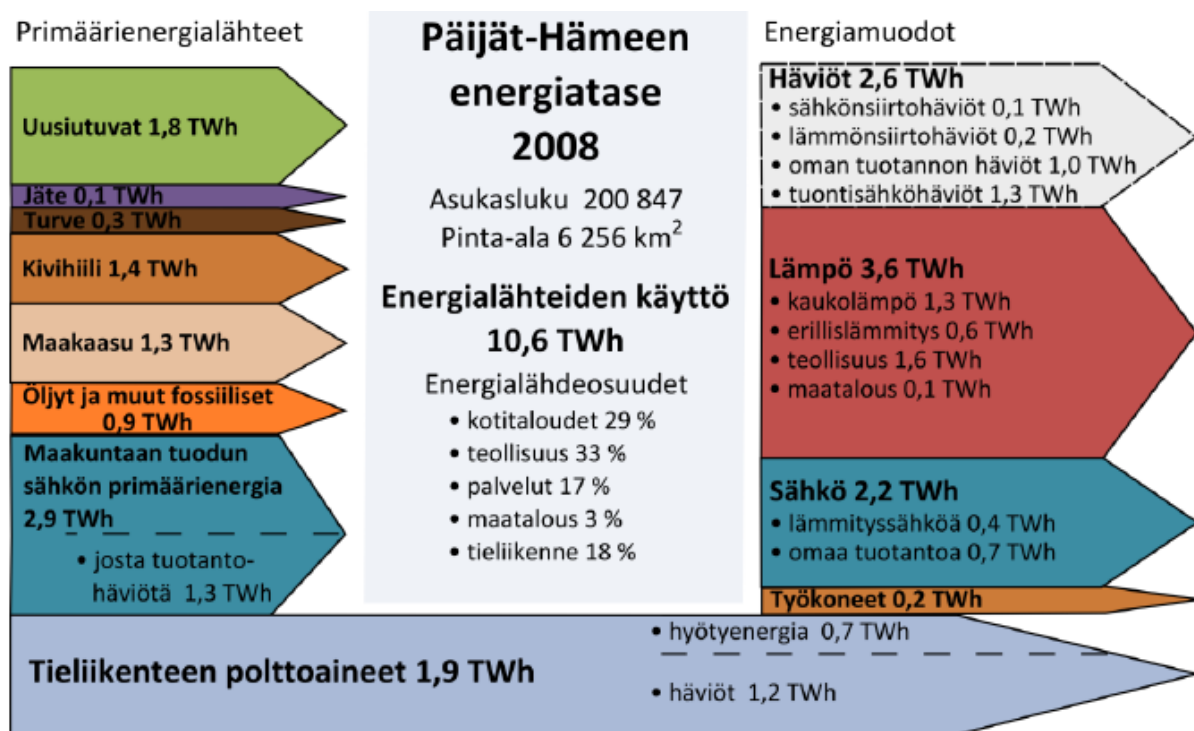
**Kuva 8.** Liikennemaantieteen mallit Rodrigueta ym. (2013) mukailten.

Rodrigue ym. (2006) toteaa, että liikennettä koskevissa paikkatietotutkimuksissa on neljä päävaihetta: koodaus, käsittely, analyysit ja raportointi. Paikkatietojärjestelmien liikennejärjestelmien koodauksella tarkoitetaan liikenneverkkoaineiston rakentamista. Liikenneverkko tulee koodata, jotta aineiston topologia on oikein noodien ja linkkien välillä. Tämä vaihe täytyy toteuttaa ennen varsinaisia analyysejä. Koodattu aineisto on sijoitettu tiedostoihin spatiaalisen, temaattisen tai ajallisen perusteen mukaan. Analyyseillä tarkoitetaan laajaa paikkatietojärjestelmien tutkimusta liikennejärjestelmien ongelmien ratkaisemiseksi. Raportoinnilla tarkoitetaan analyysien visualisointia ja kartografista osaa. Tämä osa-alue on erityisen tärkeä, koska visualisoinnin avulla pystytään kuvaamaan monimutkaista informaatiota symbolisessa muodossa. Esimerkki ohjelmistosta, jolla pystytään analysoimaan liikenneverkkopohjaista aineistoa, on ESRI:n ArcGIS-ohjelma.

## 5 Metsähakkeen materiaali- ja energivirrat Päijät-Hämeessä

### 5.1 Metsähakkeen tuotannon alueelliset edellytykset

Ekokumppanien (2011: 11–23) laskelmien mukaan Päijät-Hämeessä käytettiin energiaa 10,6 TWh vuonna 2008 (kuva 9). Fossiilisten polttoaineiden osuus on 55 prosenttia 5,5 TWh:n osuudella. Uusiutuvia energianlähteitä käytettiin yhteensä 1,8 TWh, joka vastaa 17 prosenttia kokonaiskäytöstä. Uusiutuvista energianlähteistä metsäenergian osuus on 42 prosenttia. Metsäenergia on siis merkittävässä roolissa Päijät-Hämeen energiantuotannossa.

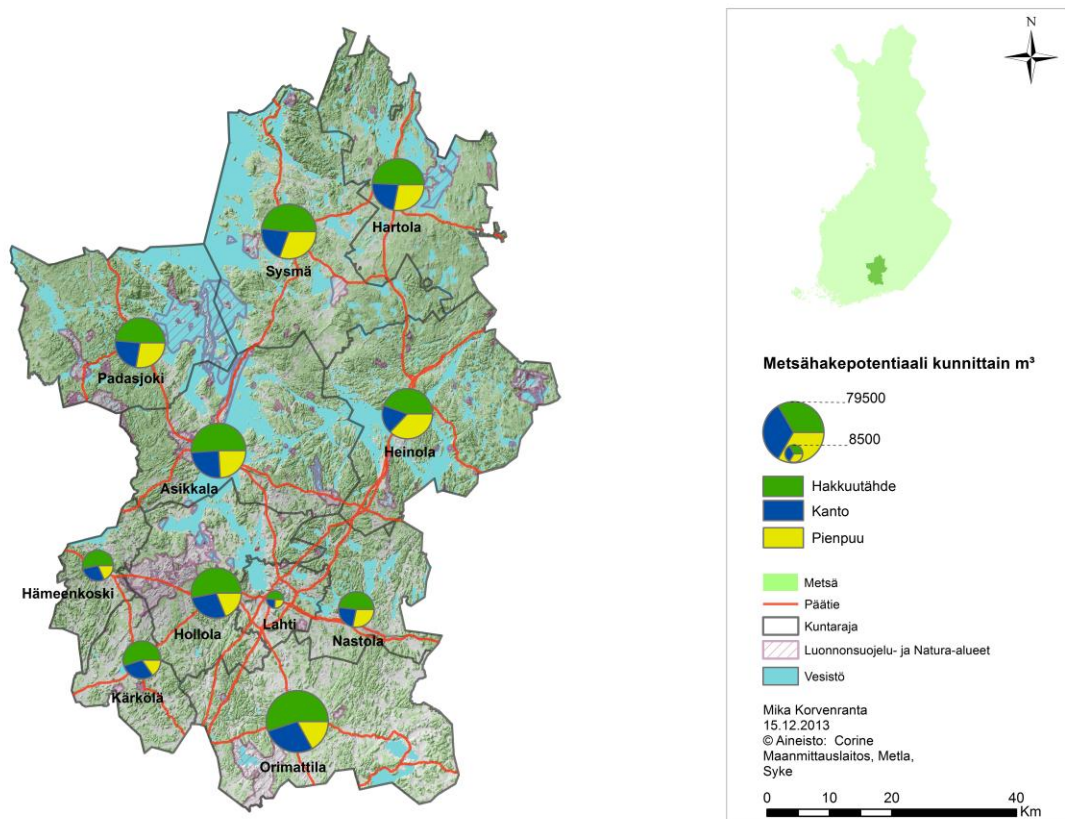


Kuva 9. Päijät-Hämeen energiatase vuonna 2008 (Ekokumppanit 2011).

Metsähakkeen tuotanto tarjoaa suurimman potentiaalilin biomassan energiakäytön lisäämiseen Päijät-Hämeessä (Hagström ym. 2012). Rantalan (2011) mukaan alueen metsät ovat pääosin kuusivaltaisia ja maapohjaltaan reheviä sekä hyväkasvuisia, mikä takaa hyvät mahdollisuudet energiapuun hankintaan. Kuusivaltaisilta reheviltä kivennäismailta energiapuun korjuuta voidaan tehdä ilman suurempaa riskiä ravinnetasapainon häiriintymisestä. Se on omalta osaltaan parantamassa edellytyksiä energiapuun korjuulle ja luomassa kestävän pohjan

puuperäisten biomassojen saatavuudelle. Päijät-Hämeen metsillä on hyvät edellytykset puuston kasvatukselle ja siten energiapuun korjuun kertymämäärien kohottamiseksi.

Hämeen alueen metsämaan pinta-alasta on yksityisomistuksessa 78 prosenttia, valtiolla 7 prosenttia, yhtiöillä noin 6 prosenttia ja muilla 9 prosenttia (kunnat, seurakunnat ja yhteisöt) (Metsäntutkimuslaitos 2012). Metsänomistajien myyntihalukkuus vaikuttaa merkittävästi siihen, kuinka metsähaketta saadaan markkinoille. Metsäkeskus Häme-Uusimaan alueella myyntihalukkuus oli vuonna 2010 keskimääräistä korkeampaa vertailtaessa Suomen muiden metsäkeskusten alueita (Hänninen ym. 2010). Tämä takaa osaltaan hyvät edellytykset metsähakkeen hyödyntämisen lisäämiseen.



**Kuva 10.** Metsähakepotentiaali kunnittain Päijät-Hämeen alueella.

Metsähakkeen teknis-taloudellinen potentiaali on määritetty Laitilan ym. (2008) ja Anttilan ym. (2009) selvityksien mukaan. Kuvassa 10 on esitetty metsähakepotentiaali kunnittain Päijät-Hämeen alueella. Laskelmissa on mukana pienpuu, hakuutähdeet sekä kannot. Suurin potentiaali on Orimattilan, Asikkalan ja Sysmän kunnassa. Sen sijaan pienin potentiaali on Lahden alueella. Potentiaalit energiapuulajeittain noudattelevat kokonaispotentiaalin lukemia eli kunnassa, jossa on esimerkiksi paljon hakuutähdepotentiaalia, on myös paljon kanto- ja

pienpuupotentiaalia. Metsähakepotentiaalia tarkasteltiin myös jakamalla potentiaali ruuduille kunnittain (liite 2). Päijät-Hämeen metsäisille alueille tehtiin viiden kilometrin ruudukko, jonka keskipisteenä potentiaalia kuvaava piste. Näistä pisteistä valikoitiin metsässä sijaitsevat pisteet ja jaettiin kunnittainen potentiaali. Korkein metsähakepotentiaali ruutua kohti on Kärkölässä. Myös Hollolan ja Orimattilan alueella on korkea potentiaali suhteessa metsäalaan.

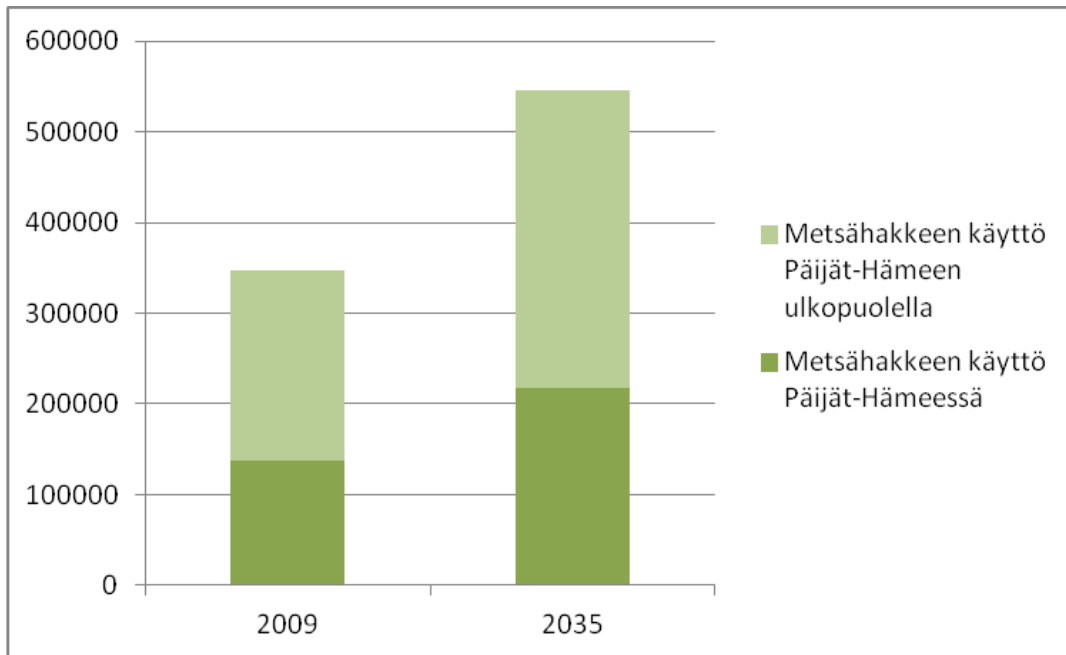
## **5.2 Metsähakkeen käytön ja potentiaalin vertailua**

Päijät-Hämeessä korjattiin energiapuuta vuonna 2009 yhteensä 347 000 m<sup>3</sup> (Liimatainen 2010). Päijät-Hämeen teknis-taloudellinen vuotuinen metsähakepotentiaali on 545 000 m<sup>3</sup> (Laitila ym. 2008; Anttila ym. 2009). Kostin (2011) mukaan metsähaketta käytettiin vuonna 2009 Päijät-Hämeen alueella olevissa laitoksissa yhteensä 137 000 m<sup>3</sup>. Pienpuuhaketta hyödynnettiin eniten reilun 40 prosentin osuudella. Hakkuutähdettä käytettiin hieman pienpuuhaketta vähemmän, noin 36 prosenttia, ja kantojen osuus metsähakkeen käytössä jäi pienimmäksi noin 22 prosentin osuudella.

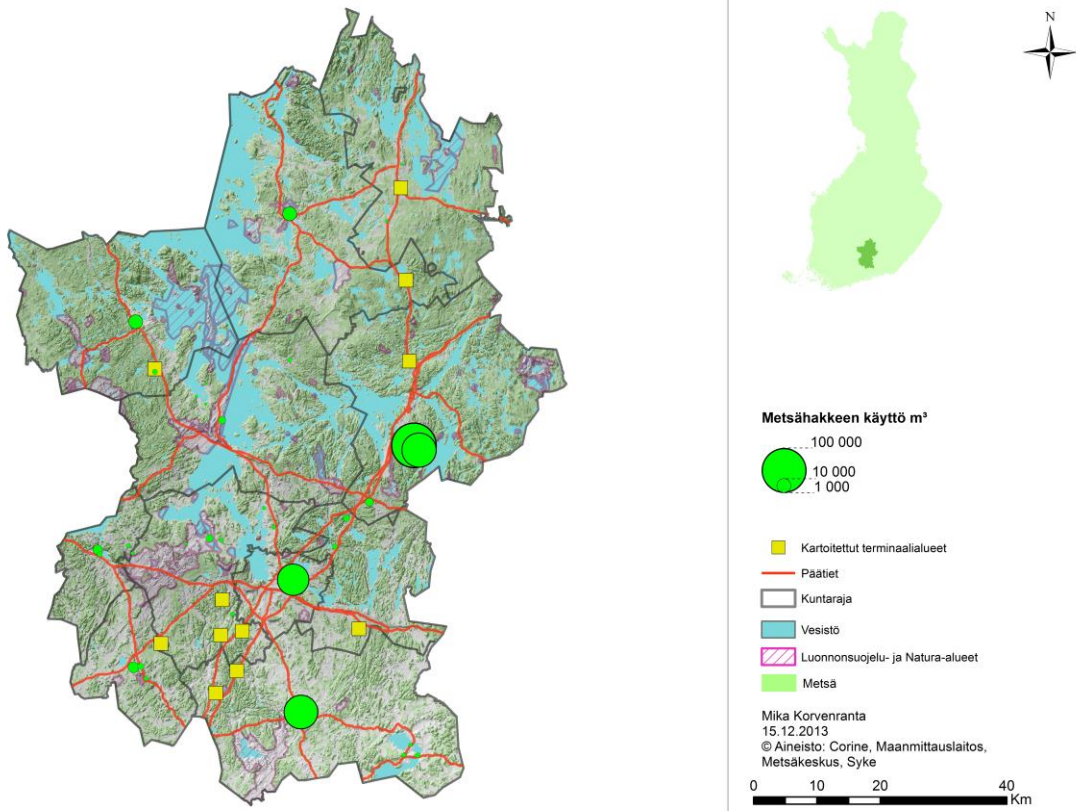
Päijät-Hämeessä tapahtuneen metsähakkeen korjuun, metsähakepotentiaalin ja metsähaketta käyttävien laitosten avulla voidaan päätellä, että Päijät-Hämeessä voidaan lisätä metsähakkeen tuotantoa teoreettisesti 198 000 m<sup>3</sup> vuodessa. Pitää kuitenkin huomioida, että vuonna 2009 tuotannosta on kuljetettu noin 60 prosenttia Päijät-Hämeen alueen ulkopuolelle. Jos vienti alueen ulkopuolelle jatkuu samankaltaisena tulevaisuudessakin, metsähakkeen käytön lisäys voi olla enimmillään 80 000 m<sup>3</sup> Päijät-Hämeessä (kuva11). Päijät-Hämeen vuoden 2009 metsähakkeen käyttö ja arvioitu maksimaalinen käyttö vuonna 2035 toimii tämän tutkimuksen metsähakkeen materiaalivirta-analyysin syöttöarvona niin ToSIA-arvioinnissa kuin paikkatietoanalyyseissä.

Hämeen maakunnassa on suunnitteilla bioenergiakeskus, jossa käytettäisiin huomattavia määriä metsähaketta raaka-aineena. Ristiinaan on suunnitteilla logistiikkakeskus, jossa tuotettaisiin biohiiltä ja metsähake olisi raaka-aineena. Päijät-Hämeen alueelta uudelle biovoimalalle on varattu paikka yleiskaavassa Lahden Hennalasta. Uusi laitos käyttäisi raaka-aineena pääasiassa puuta (Uusikallio 2012). Lahti energia on YVA-ohjelman perusteella korvaamassa Kymijärvi 1 laitostaan uudella laitoksella, jossa metsähakkeen käytön osuus

olisi merkittävä (Lahti energia Oy 2013). Metsähakkeen käytön määrää on kuitenkin vaikea arvioida tarkasti etukäteen, joka tapauksessa uusi biovoimala Lahdessa nostaa metsähakkeen käyttöä merkittävästi Päijät-Hämeen alueella. Metsähakkeen käytössä on odotettavissa näiden tietojen perusteella huomattavaa kasvua vaikuttaen laajasti Päijät-Hämeen metsähakevarantoihin. Metsäenergian raaka-ainevaroista on odotettavissa kilpailua, koska käyttö lisääntynee huomattavasti Päijät-Hämeen viereisissä maakunnissa.



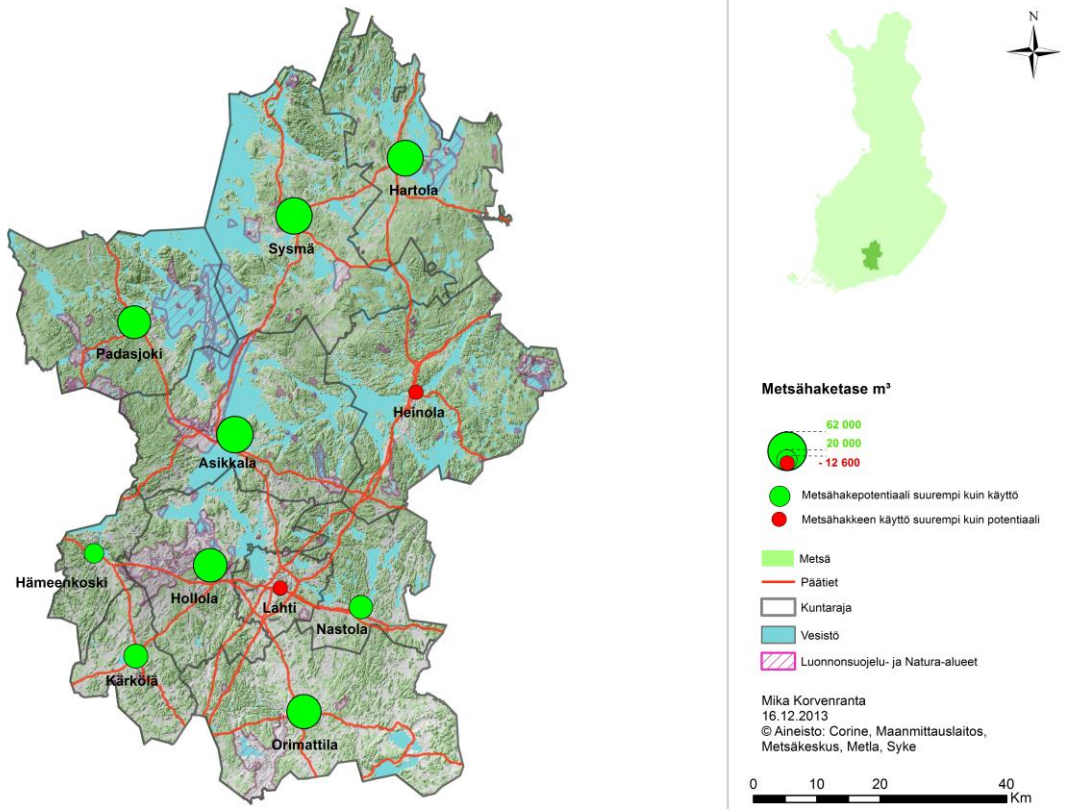
**Kuva 11.** Metsähakkeen korjaaminen Päijät-Hämeessä vuonna 2009 kiintokuutiometreinä ja arvioitu maksimaalinen käyttö Päijät-Hämeessä. Tiedot perustuvat Metlan aineistoon maksimaalisesta potentiaalista (Laitila ym. 2008; Anttila ym. 2009), Liimataisen (2010) selvitykseen metsähakkeen korjuusta sekä Koistin (2011) selvitykseen metsähakkeen käytöstä. Aineiston perusteella on laskettu arvio vuoden 2035 maksimaalisesta käytöstä, jos metsähakkeen vienti maakunnan ulkopuolelle jatkuu suhteellisesti samansuuruisena myös tulevaisuudessa.



**Kuva 12.** Metsähakkeen käyttö Päijät-Hämeessä vuonna 2009 Koistin (2011) mukaan.

Metsähaketta käyttäviä käyttökohteita Päijät-Hämeessä on yhteensä 34 (kuva 12). Suuri osa näistä on kuitenkin melko pieniä. Suurimmat käyttökohteet sijaitsevat Heinolassa, Lahdessa sekä Orimattilan alueella. Päijät-Hämeessä on useita uusia käyttökohteita. Näitä on muun muassa Sysmässä, Orimattilassa, Hämeenkoskella ja Padasjoella. Tämän tiedon perusteella voidaan olettaa, ettei ainakaan kunnissa, joissa on juuri valmistunut metsähaketta käyttävä lämpölaite, metsähakkeen käyttö ei tule kasvamaan kovin radikaalisti tulevaisuudessa. Kuvassa 12 on myös WSP Finland Oy:n (2012a) tekemän kartoituksen mukaiset mahdolliset metsähaketerminaalien sijoituspaikat Päijät-Hämeen alueella.

Verrattaessa maksimaalista metsähakepotentiaalia ja metsähakkeen käyttöä vuonna 2009 nähdään, että Lahden ja Heinolan alueella metsähaketta käytetään enemmän kuin näiden kuntien alueella on metsähakepotentiaalia (kuva 13). Muiden kuntien alueella metsähaketta on tarjolla yleisesti ottaen reilusti enemmän kuin metsähaketta käytetään.



**Kuva 13.** Metsähakkeen teknis-taloudellisen potentiaalin ja käytön erotus Päijät-Hämeessä kunnittain tarkasteltuna.

## 6 Aineistot ja menetelmät

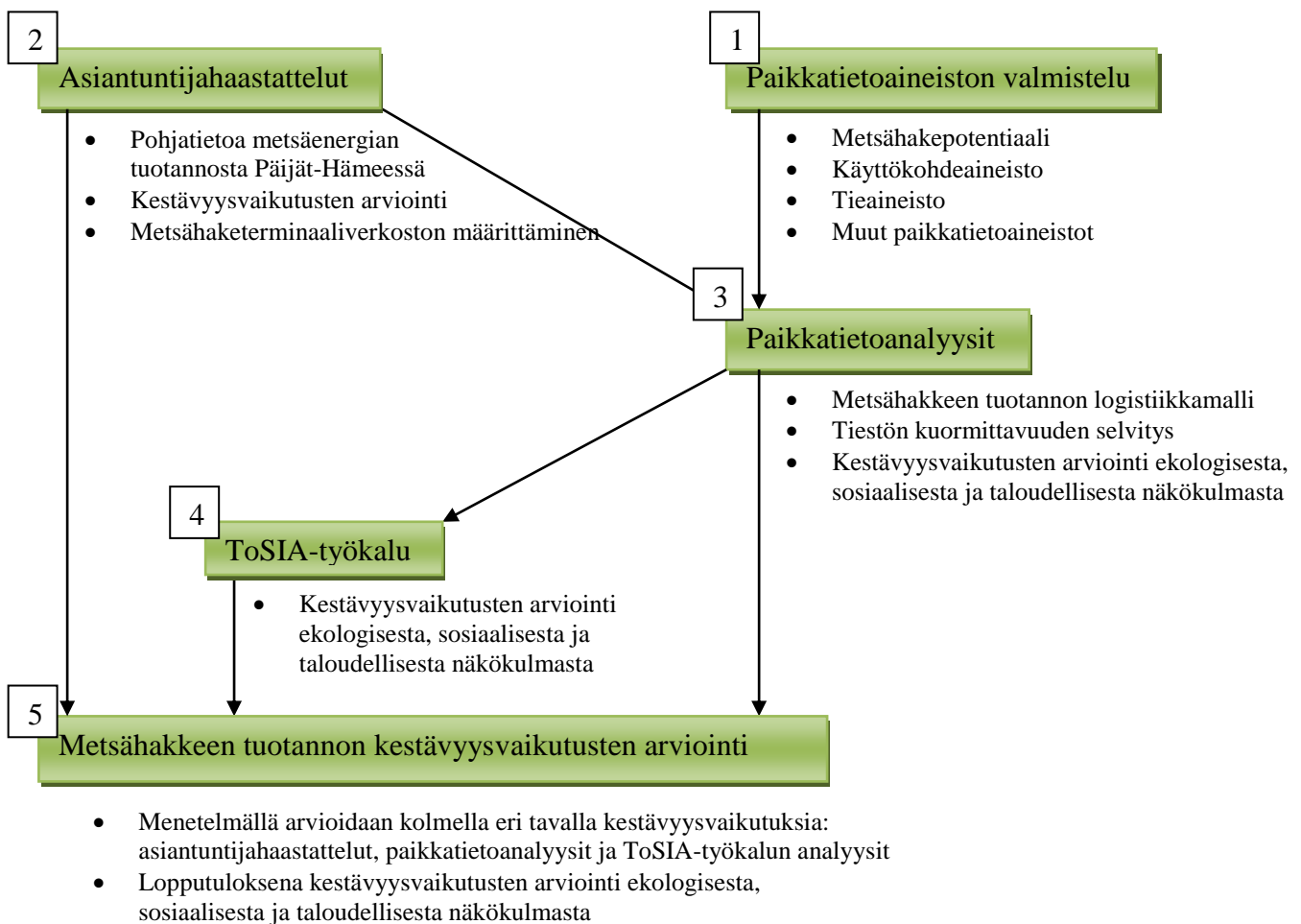
Tutkimusmenetelmällä tarkoitetaan toimenpiteitä, menettelytapoja ja käytäntöjä aineiston keräämiseksi ja analysoimiseksi (Pihlaja 2009: 140). Hirsjärvi ym. (2009) informoi, että tutkimusmenetelmät jaotellaan laadullisiin ja määrällisiin eli kvalitatiivisiin ja kvantitatiivisiin menetelmiin. Molemmissa menetelmissä voidaan tutkimuksen validiutta tarkentaa useilla eri menetelmillä. Useiden eri menetelmien yhteiskäytöstä käytetään termiä metodinen tai metodologinen triangulaatio. Tässä pro gradu- tutkielmassa on päädytty käyttämään triangulaatiota tutkimusmenetelmänä, jotta laajasta aihepiiristä saadaan mahdollisimman monipuolisesti luotettavaa tietoa. Triangulaatiomenetelmällä voidaan parantaa myös tutkimuksen luotettavuutta (Tuomi & Sarajärvi 2002). Tutkielmassa on käytetty kolmea eri menetelmää. Menetelmät tukevat toisiaan ja kolmen eri menetelmän avulla voidaan arvioida metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutuksia monipuolisesti eri tavoilla. Kolme menetelmää tukevat myös hyvin systeemiajattelun lähtökohtia materiaalivirta-analyysille. Kolme menetelmää muodostavat avoimen systeemin, jossa eri menetelmät muodostavat alasysteemejä systeemin kokonaisuudessa, joka on havainnollistettu kuvassa 14. Alasysteemistä toiseen liikkuu materiaalivirta, esimerkiksi asiantuntijahaastatteluiden perusteella määritetty terminaaliverkosto toimii yhtenä syöttöarvona logistiikkamallille.

Asiantuntijahaastatteluilla saatiin perustietoa Päijät-Hämeen alueellisista piirteistä metsähakkeen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutuksissa. Haastateltavat määrittivät kartalle optimaalisen terminaaliverkoston Päijät-Hämeen alueelle, jota käytin metsähakkeen tuotannon logistiikan paikkatietomallin luomiseen. Terminaalit oli määritettävä, jotta tiedetään terminaalien sijainti terminaalihaketuksen tuotantoketjulla logistiikkamallissa. Paikkatietomenetelmillä on arvioitu kestävyyttä tiestön käytön kuormittavuuden, onnettomuuksien ja metsähakekuljetusten esteiden kautta, minkä perusteella on mahdollista tehdä johtopäätöksiä tuotannon kestävydestä.

Paikkatietopohjaisen logistiikkamallin avulla on saatu optimaalisimmat reitit metsästä käyttökohteelle ja terminaalista käyttökohteelle sekä keskiarvoiset matkat kaukokuljetukselle eri tuotannon skenaarioille. Näitä lukemia on käytetty pohjatietona ToSIA-työkalun analyyseissä, jotta voidaan arvioida tienvarsihaketuksen ja terminaalihaketuksen logistiikan



kestävyysvaikutusten eroavaisuuksia yhtenäisesti eri menetelmillä. ToSIA-työkalun arvioinnissa on käytetty samoja parametreja kuin paikkatietopohjaisessa logistiikkamallissa hakkeen käytöstä vuonna 2009 ja vuoden 2035 oletetusta käyttömäärästä Päijät-Hämeessä. ToSIA-työkalulla arvioidaan koko tuotantoketjua, joten on mahdollista tutkia kaukokuljetuksien vaikutusta kestävyysvaikutuksiin koko tuotantoketjun osalta ja näin määrittää kaukokuljetuksen merkitystä logistiikan kestävyysvaikutusten arvioinnissa. Kuvassa 14 on havainnollistettu menetelmien aikataulua ja merkitsevyyttä systeemin kokonaisuudessa.



**Kuva 14.** Kaavio tutkimuksen vaiheista systeemanalyysissä. Asiantuntijahaastattelut muodostavat perustan tutkielman analyysihin. Asiantuntijoiden määrittämää terminaaliverkostoa käytetään pohjana terminaalihaketuksen tuotantoketjun paikkatietoanalyysissä. Paikkatietoanalyysillä on tehty logistiikkamalli, jossa optimoituja keskimääräisiä kuljetusmatkoja käytetään ToSIA-työkalun laskennoissa. Kestävyysvaikutuksia arvioidaan asiantuntijahaastatteluilla, paikkatietoanalyysillä ja ToSIA-työkalulla.

## 6.1 Paikkatietoaineistot

Tutkielmassa käytetään laajasti erilaisia paikkatietopohjaisia aineistoja. Metsäntutkimuslaitoksen metsähakepotentiaaliaineisto muodostaa pohjan tarkasteluille Metsäkeskuksen käyttökohdeaineiston ja liikenneviraston tieaineiston kanssa. Lisäksi on tuotettu paikkatietomuotoista aineistoa haastatteleamalla kymmentä Päijät-Hämeen alueen metsäenergia-alan toimijaa ja asiantuntijaa. Tämä paikkatietopohjainen haastatteluaineisto on pohjana metsähaketerminaalien optimaalisimmille paikoille.

Analyyseissä käytetyt paikkatietoaineistot:

- *Asiantuntijahaastatteluilla tuotettu terminaaliaineisto*
- *Esrin taustakartta-aineisto*
- *Liikenneviraston digiroad-aineisto*
- *Liikenneviraston tieliikenneonnettomuusaineisto*
- *Maanmittauslaitoksen kuntarajat*
- *Metsäkeskuksen metsähakkeen käyttökohdeaineisto*
- *Metsäntutkimuslaitoksen metsähakepotentiaaliaineisto*
- *Suomen ympäristökeskuksen Corine- maanpeitteen- ja maankäytön aineisto*
- *Suomen ympäristökeskuksen luonnonsuojeluaineisto*

Møller-Jensen (2013) toteaa, että liikenneverkkoaineiston tulisi olla mahdollisimman lähellä oikeaa kustannusta, matka-aikaa, minkä avulla voidaan varmistaa analyysin luotettavuutta. Kuljetusverkkoaineisto on valmisteltu vastaamaan mahdollisimman hyvin metsähakekuljetuksen todellisia vaatimuksia. Aineistoon on luotu keskinopeusominaisuus tiestön luokittain (ks. taulukko 1), jonka perusteella logistiikan optimointia on tehty. Nopeuden mukaisella optimoinnilla pyritään luomaan totuudenmukainen optimointi kuljetusreiteistä, mikä takaa esimerkiksi isompien teiden käytön ensisijaisena vaihtoehtona mahdollisen lyhyemmän ja hitaamman reitin sijaan. Varsinaisissa jatkoanalyyseissä käytetään matkaan perustuvia tuloksia optimoinnista, joten keskinopeusarvot eivät ole mukana jatkoanalyyseissä. Lisäksi tieverkolle on asetettu esteitä tieaineiston ominaisuustietojen perusteella paikkoihin, joissa metsähakekuljetus ei voi todellisuudessa kulkea. Aineistossa havaittiin esteitä Päijät-Hämeen alueella 2031 kappaletta (taulukko 2).

**Taulukko 1.** Metsäenergian kaukokuljetuksen keskinopeudet logistiikan optimoinnissa tieosuuksittain digiroad-aineistossa (Tahvanainen & Anttila 2011).

Koodi aineistossa	Toiminnallinen luokka	Keskinopeus km/h
1	Valtatie	85
2	Kantatie	80
3	Seututie	75
4	Yhdystie	70
5	Tärkeä yksityistie	70
6	Muu yksityistie	50

Metsähakekuljetusesteistä suljettuja yhteyksiä eli fyysisiä esteitä on Päijät-Hämeessä eniten: digiroad-aineistossa yhteensä 1390 (ks. taulukko 2). Seuraavaksi eniten oli esteitä, joissa ajoneuvolla ajo on kielletty. Suurimman sallitun korkeuden esteitä aineistossa on yhteensä 30 kappaletta. Suurin sallittu massa on esteenä neljässä kohtaa Päijät-Hämeessä. Aineistosta katsottiin myös luokkia suurimman sallitun pituuden ja suurimman sallitun leveyden näkökulmasta, mutta näissä luokissa kuljetuksen esteitä ei löytynyt Päijät-Hämeestä.

**Taulukko 2.** Metsähakkeen tuotannon kaukokuljetusten esteitä Päijät-Hämeessä digiroad-aineistossa.

Este	Selite	Päijät-Hämeessä kpl
Suljettu yhteys	Suljettu yhteys ilmaisee fyysistä estettä, joka estää tie- ja katuverkon käyttämisen. Kyseisen kohdan kautta esim. katujen yhteys on katkaistu kivillä, ojalla tai puomilla, jota ei voi avata	1390
Ajoneuvo kielletty	Kiellettyjen teiden luokittelu: kaikki, moottoriajoneuvo, ajoneuvo, kuorma-auto, ajoyhdistelmä, läpiajo	607
Ajoneuvon suurin sallittu korkeus	Suurin sallittu korkeus pienempi kuin 4 metriä	30
Ajoneuvon suurin sallittu massa	Suurin sallittu ajoneuvon massa pienempi kuin 60 tonnia	4
Ajoneuvon tai ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu pituus	Suurin sallittu pituus pienempi kuin 22 metriä	0
Ajoneuvon suurin sallittu leveys	Suurin sallittu leveys pienempi kuin 2,6 metriä	0

Aineistona metsähakepotentiaalin luomiseen on käytetty ensimmäisenä Corine-maanpeitteen aineistoa, josta on valittu metsäalueet Päijät-Hämeestä. Metsäalan tasosta on vähennetty luonnonsuojelualueet ja Natura-alueet Suomen ympäristökeskuksen aineiston mukaisilta alueilta. Varsinainen metsähakepotentiaaliaineisto on luotu Metsäntutkimuslaitoksen teknis-taloudellisen kuntakohtaisen maksimaalisen potentiaalin mukaan. Metsäisille alueille on tehty

ArcGIS-ohjelmiston *Create Random points* -työkalulla pisteitä kuntakohtaisen maksimaalisen potentiaalin mukaisesti niin, että yksi piste vastaa 100 irtokuutiota (liite 3). Potentiaalipisteitä ei ole jaoteltu energiapuulajikkeittain. Yhteensä pisteitä Päijät-Hämeen alueelle muodostui 13 177.

## 6.2 Asiantuntijahaastattelut

Åkerman & Alastalo (2010) määrittävät asiantuntijahaastattelun tarkoittavan tilannetta, jossa pyritään hankkimaan tietoa tutkittavasta ilmiöstä tai prosessista alan asiantuntijoita haastatteleamalla. Asiantuntijahaastatteluiden tarkoituksena tässä tutkimuksessa on faktuaalinen analyysi eli pyrkimys löytää faktatietoa tutkittavasta asiasta. Asiantuntijahaastatteluiden analyysissä haastattelut ovat vain yksi osa moniaineistosta tutkimusprosessia. Menetelmää käytetään yleisesti taustatiedon hankkimiseksi. Tutkijan on tehtävä itselleen selväksi, millä perusteella tutkimuksessa etsitään faktoja. Tämän lisäksi luotettavuutta tulisi tarkastella esimerkiksi kirjallisuudessa esitettyjen tiedon kanssa.

Asiantuntijahaastatteluiden tavoitteena on saada tietoa Päijät-Hämeen alueen metsähakkeen tuotannon tilasta ja tulevaisuuden vaihtoehdoista. Haastateltaviksi henkilöiksi on valittu mahdollisimman monipuolisesti eri organisaatioissa työskenteleviä henkilöitä. Ryhmät jaettiin aluesuunnittelun asiantuntijoihin, metsäalan asiantuntijoihin ja yritysten asiantuntijoihin. Näin tutkielmassa voidaan huomioida laajasti eri näkökulmia. Tarkoituksena on syventyä metsähakkeen tuotannon, metsähakkeen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutuksiin ja metsähaketerminaalien vaikutuksiin metsähakkeen tuotannossa. Haastattelussa käsiteltiin ensimmäisessä osiossa metsähakkeen tuotannon kysymyksiä asiantuntijaryhmittäin eri kysymyksiin taustatiedon hankkimiseksi (liite 4). Toinen osio käsitteli metsähakkeen tuotannon logistiikan kysymyksiä ja kolmas terminaalien sijoittelun kysymyksiä. Ryhmittelin haastateltavien mielipiteitä omiin luokkiin, jotta on mahdollista selvittää eri mielipiteiden voimakkuus. Haastattelut analysoitiin etsimällä faktatietoa kirjallisuuden väittämiä silmällä pitäen.

Haastateltavia organisaatioita oli yhteensä kymmenen. Haastateltavat organisaatiot olivat Metsänhoitoyhdistys, Metsänomistajien liitto, Metsäkeskus, Päijät-Hämeen liitto, ELY-keskus, Lahden Seudun Kehitys LADEC Oy, Koskisen Oy, Biowatti Oy, Fortum Oy ja Lahti

Energia Oy. Haastattelut toteutettiin pääasiassa haastateltavien toimistolla, yhtä lukuun ottamatta, mikä toteutettiin sähköpostin välityksellä. Haastattelut tehtiin aikavälillä 8.-25.1.2013.

### **6.3 Network Analyst**

ArcGIS-ohjelmistossa on *Network Analyst* -laajennusosa nimenomaan liikenneverkkojen (*Network Dataset*) analysoimiseksi. Kyseisellä työkalulla voidaan mallintaa kuljetusverkkoa verkostopohjaisen aineiston avulla. Verkostoaineisto voi olla esimerkiksi putkista tai tiestöstä. Logistiikkaa mallintaessa on käytettävä liikenneverkostoa aineistopohjana, jotta voidaan mallintaa kuljetuksia tieverkolla. Tutkimuksessa käytettiin Liikenneviraston ylläpitämää digiroad-aineistoa.

Onnistuneen liikenneverkkoaineiston luominen on *Network Analystin* perusta. Liikenneverkkoaineistossa on kolmenlaisia elementtejä: reunat (edges), risteykset (junction), ja käännökset (turns) (ESRI 2013b). Reunojen ja risteyksien liittäminen toisiinsa nähdessä määrittää *Network Datasetin* konnektiivisuuden eli sen miten aineisto on linkittynyt toisiinsa nähden. Käännökset elementtiin säilötään informaatiota liikenneverkon käännöksien mahdollisuuksista. Kun liikenneverkkoaineistossa on määritetty aineiston konnektiivisuus toisiinsa nähden, mallinetaan tiestöön ominaisuus, jonka perusteella optimointia tehdään. Se voi olla esimerkiksi matka, aika tai kustannus tiestöllä.

*Network Analystissä* voidaan käyttää eri työkaluja verkostoaineistoselvityksissä, joita ovat *Route*, *Closest facility*, *Service area*, *OD Cost Matrix*, *Vehicle Routing Problem* ja *Location-Allocation* (ESRI 2013c). Näiden työkalujen avulla voidaan selvittää esimerkiksi missä on lähin lämpölaite, mihin kannattaisi perustaa metsähaketerminaali, mikä on lyhin reitti metsästä käyttökohteelle. Kysymysten avulla *Network Analyst* -työkalulla voidaan tehdä parempia strategisia päätöksiä, tehostaa menossa olevia operaatioita ja ymmärtää markkinoita tiedon avulla. Toiminnoilla voidaan tuottaa säästöjä eri organisaatioille monipuolisesti tutkimusongelmasta riippuen.

*Network Analystissä* reitin optimointi pohjautuu Dijkstran algoritmiin, jossa etsitään lyhintä reittiä annetusta lähtöpisteestä haluttuun määränpäähän (ESRI 2013c). Dijkstran (1959)

mukaan Dijkstran algoritmi etsii lyhimmän polun pisteestä  $s$  kaikkiin muihin pisteisiin. Löytääkseen lyhimmän reitin määränpääpisteeseen  $d$  algoritmi käy kaikki mahdolliset vaihtoehdot läpi. Liikenneverkkoaineistossa määritettyjen reunojen (edges) arvojen täytyy olla positiivisia laskennassa, sillä reitin optimointi ei toimi negatiivisilla arvoilla.

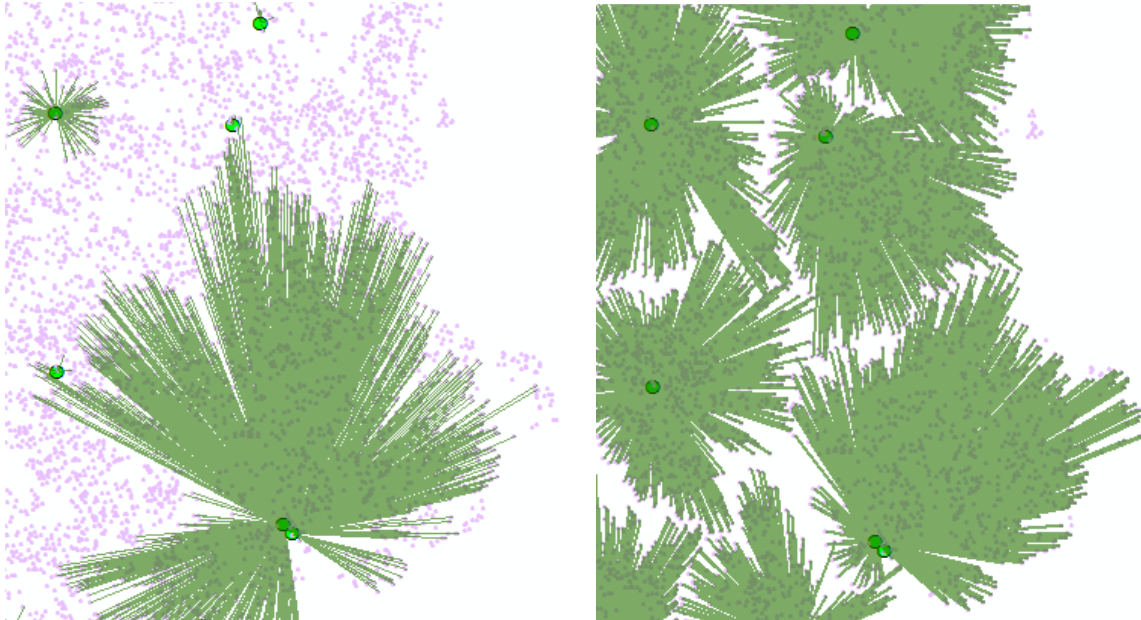
Mitchell (2012) määrittää seitsemän eri vaihetta paikkatietopohjaisessa vuorovaikutusten mallinnuksessa:

1. Määritä tarvittava ratkaisu
2. Luo verkosto
3. Täsmennä laitokset
4. Täsmennä kysyntäpisteet
5. Suorita malli
6. Arvioi tulokset
7. Esitä ja sovelleta tuloksia

Vuorovaikutuksen mallinnusta *Network Analyst*illä voidaan tehdä *Location-Allocation* -työkalulla, jolla optimoidaan materiaalivirtoja määritettyihin paikkoihin. Analyysi alkaa lyhimmän polun matriisin tekemisellä *demand*- ja *facility*- tasolle (ESRI 2013c). Matriisia editoidaan *Hillsman editing* -prosessilla (Hillsman 1984). *Location-Allocation* generoi tämän jälkeen puolisuunnaisen ratkaisun, jota jalostetaan solmukorvausheuristiikalla optimaalisen ratkaisun saamiseksi (Teitz & Bart 1968). Lopuksi menetelmä käyttää metaheuristiikkaa parhaan ratkaisun löytämiseksi (ESRI 2013c).

Menetelmää on käytetty muun muassa koulujen spatiaalisen saavutettavuuden mallintamiseen, jolloin on tarkasteltu oppilaiden sijaintia kouluihin (ks. Møller-Jensen 2013). Metsäenergian mallinnuksessa on tiedettävä metsähakkeen käyttökohteet ja metsähakkeen potentiaali, jotta voidaan mallintaa vuorovaikutusta *Location-Allocation* -työkalulla. Mitchelin (2012) mukaan *Network Analyst*issä on useita erilaisia ratkaisuja vuorovaikutuksen mallintamiseen. Voidaan esimerkiksi mallintaa tarjontapisteiden lyhin reitti määritetyille laitoksille. Määritetyn tarvittavan ratkaisun jälkeen voidaan valita esimerkiksi *Minimize Impedance* -ratkaisu, jossa ohjelmisto laskee pienimmän kokonaiskustannuksen tarjontapisteistä määritetyille kysyntäpisteille. *Maximize Capacited Coverage* -toiminnossa

on määritettyä laitosten kapasiteetti, jonka perusteella kysyntäpisteille suuntautuu kapasiteettia vastaava materiaalivirta (ks. kuva 15).



**Kuva 15.** *Maximize Capacitated Coverage* ja *Minimized Impedance* ArcGIS 10.1 -ohjelmistossa. Vasemmassa kuvassa raaka-aine ohjautuu lähtöpisteistä määränpään vastaanottokapasiteetin mukaan. Oikeassa kuvassa ei ole asetettuna kapasiteettirajoitusta, jolloin optimointi tapahtuu lähtöpisteistä lähimpään määränpään.

#### 6.4 Hot Spot -analyysi

Spatiaalisessa tilastotieteessä lähdetään yleensä liikkeelle määrittelemällä nollahypoteesi, jota testataan eri testeillä. Jos aineistossa havaitaan spatiaalista autokorrelaatiota, nollahypoteesin vastahypoteesi astuu voimaan (Mitchell 2005). Spatiaalisella autokorrelaatiolla tarkoitetaan, että toisiaan lähellä olevat havaintoarvot pyrkivät olemaan samanlaisempia kuin toisistaan kauempana olevat havaintoarvot (Tobler 1970). Spatiaalista autokorrelaatiota voidaan testata lokaalisti tai globaalisti. Lokaalilla testaamisella onnistuu paremmin yksittäisten klustereiden etsiminen, joita *Hot Spot* -analyysissä etsitään (Ord & Getis 1995; Anselin 1995). ArcGIS-ohjelmistossa käytetään *Getis-Ord Gi\** statistiikkaa (kuva 16) hot spottien "kuumien alueiden" tai cold spottien "kylmien alueiden" etsimiseen (ESRI 2013d). Statistiikka lasketaan kaikille analyysin kohteena olevalle aineistolle, esimerkiksi pistemuotoista aineistoa käytettäessä statistiikka lasketaan jokaiselle pisteelle (Getis & Ord 1992; Ord &

Getis 1995). Analyysissä tarkastellaan lähellä olevaa aineistoa mitattavaan kohteeseen nähden, minkä perusteella statistiikka lasketaan. Ennen varsinaista *Hot Spot* -analyysiä lasketaan havaintopisteiden eri etäisyyksille spatiaalinen autokorrelaatio *Global Moran's I*:n perusteella (ESRI 2013d). Tämän jälkeen valitaan suurin spatiaalisen autokorrelaation etäisyys. Menetelmällä voidaan parantaa *Hot Spot* -analyysin luotettavuutta valitsemalla oikea etäisyys analyysiin.

The Getis-Ord local statistic is given as:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - \left( \sum_{j=1}^n w_{i,j} \right)^2}{n-1}}} \quad (1)$$

where  $x_j$  is the attribute value for feature  $j$ ,  $w_{i,j}$  is the spatial weight between feature  $i$  and  $j$ ,  $n$  is equal to the total number of features and:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (2)$$

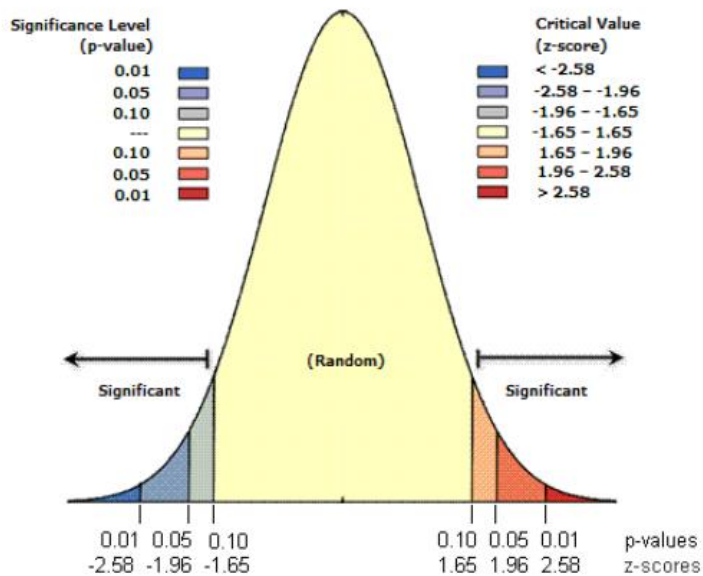
$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (\bar{X})^2} \quad (3)$$

The  $G_i^*$  statistic is a  $z$ -score so no further calculations are required.

**Kuva 16.** Getis-Ord  $G_i^*$  menetelmän statistiikka *Hot Spot* -analyysissä (ESRI 2013d).

Testisuurena on  $Z (G_i^*)$ , jonka otantajakauma on  $N (0,1)$ . Hot spotit sijaitsevat teoreettisen normaalijakauman  $z$ -arvojen positiivisessa hännässä ja cold spotit negatiivisessa hännässä.  $P$ -arvosta nähdään tuloksen tilastollinen merkitsevyys.  $P$ -arvon yleisimmät raja-arvot ovat 0,1, 0,05 ja 0,01 (Mitchell 2005: 64). Hyvin luotettavassa analyysissä  $p$ -arvon tulisi olla korkeintaan 0,01. Tämä tarkoittaa, että hot tai cold spotia ei ole yhden prosentin riskillä. Tämän tutkielman *Hot Spot* -analyyseissä on käytetty yhden prosentin riskitasoa, jolloin testisuureen arvo on vähintään +2,58 tai korkeintaan -2,58 kuten kuvassa 17 ilmenee. Näin saadut hot spotit ja cold spotit ovat tilastollisesti merkitseviä.





**Kuva 17.** Merkitsevyyden testaus *Hot Spot* -analyysissä (ESRI 2013d). Kriittiset arvot kaksisuuntaisessa testissä.

## 6.5 Metsähakkeen tuotannon paikkatietopohjaisen logistiikkamallin laskeminen

Paikkatietopohjaisella logistiikkamallilla tarkoitetaan mallia, jolla voidaan selvittää metsäenergiakuljetusten kaukokuljetusten vaihtoehtoja tiestöllä. Logistiikkamalli sisältää tienvarsihaketuksen tuotantoketjun analyysissä hakekuljetukset tievarresta käyttökohteelle ja terminaalihaketuksen tuotantoketjussa energiapuukuljetukset tienvarresta terminaaliin ja hakekuljetukset terminaalista käyttökohteelle.

Paikkatietopohjaista logistiikkamallia laskettaessa metsähakepotentiaaliaineisto toimii paikkatietoanalyysien tutkimusaineistona. Käyttökohteiden osalta aineisto perustuu Koistin (2011) selvitykseen metsähakkeen käytöstä Päijät-Hämeessä vuonna 2009. Vuoden 2035 metsähakkeen käyttö on arvioitu haastattelutulosten ja maksimaalisen metsähakepotentiaalın sekä Koistin (2011) käyttökohdeaineiston ja Liimataisen (2010) selvityksen metsähakkeen tuotannosta perusteella (kuva 11). Tutkielmassa käytetty metsähakkeen energiasisältö ja muuntokertoimet on määritetty Alakankaan (2000) mukaan.

Terminaaliverkosto on määritetty haastatteluiden tuloksista. Jokaista haastateltavaa pyydettiin piirtämään kartalle optimaalinen terminaaliverkosto. Paperikartalle piirretyt pisteet on siirretty ensin digitaaliseen muotoon ArcGIS-ohjelmistossa. Pisteitä oli sijoitettu yhteensä 42 kappaletta. Keskimääräinen terminaalien määrä voidaan laskea jakamalla sijoitetut pisteet

vastanneiden määrällä ( $42/10= 4,2$ ). Kartalle sijoitetuille pisteille on tehty *Point Density* -analyysi ArcGIS-ohjelmistolla. Analyysi ottaa huomioon pisteiden lähellä olevan alueen ja laskee pistetiheyden tutkittavalle alueelle (Deshpande ym. 2011: 343). Analyysissä nousi esiin neljä aluetta korkeammalla pistetiheydellä. Nämä neljä aluetta on valikoitu terminaalien sijaintipaikoiksi, koska vastaajien mukaan optimaaliseen terminaaliverkostoon muodostui keskimäärin neljä terminaalia. Optimaalisen sijoittelun laskemisen jälkeen terminaaleille on määritettävä materiaalivirta, jotta terminaaleja voidaan käyttää logistiikan optimoinnissa mukana. Viljaniemen terminaalin mahdolliseksi metsähakkeen kapasiteetiksi on arvioitu 100 000 tonnia metsähaketta (WSP Finland Oy 2012b). Tämä vastaa noin 115 000 kiintokuutiota haketta. Määrittäessä on käytetty Korpilahden & Suuriniemen (2001) oletuksia, jossa kiintokuutio hakkuutähdettä tai murskaa on keskimäärin 867 kg.

Terminaalien mitoituksessa käytettiin eri lukemia vuosien 2009 ja 2035 mallinnuksessa. Vuoden 2009 tuotantomalleissa on käytetty pienempiä summia haketta, koska metsähakkeen käytön oletetaan kasvavan vuoteen 2035 mennessä. Viljaniemen terminaalin kapasiteetiksi määritettiin vuodelle 2009 50 200 kiintokuutiometriä ja muille terminaaleille 29 000, koska muiden terminaalien maksimaalista kapasiteettia on vaikea arvioida. Vuodelle 2035 Viljaniemen terminaalin kapasiteetiksi määritettiin maksimaalinen eli 115 200 kiintokuutiota ja kolmelle muulle terminaalille 34 000 kiintokuutiota.

Kuljetusmallin laskeminen on toteutettu optimoimalla kuljetusreitit metsästä laitokselle prosessoidun metsähakepotentiaaliaineiston (ks. s. 34–35) ja metsähaketta käyttävien laitoksien avulla. Potentiaaliaineisto toimii mallin tarjontapisteinä ja metsähakkeen käyttökohteet kysyntäpisteinä tienvarsihaketuksen tuotantoketjussa. Terminaalihaketuksen tuotantoketjussa analyysi tehdään kaksivaiheisena. Ensimmäisessä vaiheessa potentiaalipisteet ovat tarjontapisteinä ja terminaalit kysyntäpisteinä. Toisessa vaiheessa terminaalipisteet ovat tarjontapisteinä ja käyttökohteet kysyntäpisteinä. Optimointi toteutettiin ArcGIS *Location-Allocation* -työkalun *Maximize Capacitated Coverage* -toiminnolla (ks. s. 37–38). Malli laskee optimaalisimmat tarjontapisteet kysyntäpisteiden kapasiteetin mukaan. Reittien määrän perusteella voidaan laskea tiestöllä kulkeva hakkeen määrä, sillä yksi reitti vastaa 100 irtokuutiota. Reitti on laskettu 100 irtokuutiolla, koska kaikille kysyntäpisteille löytyy käytetyllä arvolla maksimaalinen kapasiteetti. Työkalun

algoritmi ei osaa jakaa tarjontapisteeltä kysyntäpisteelle suuntautuvaa arvoa, joten luotettavin analyysin tulos saadaan jakamalla tarjontapisteet mahdollisimman pieniksi arvoiksi.

Tutkielmassa on laskettuna tienvarsihaketuksen ja terminaalihaketuksen tuotantoketjujen materiaalivirta Päijät-Hämeessä. Laskennat on tehty vuosille 2009 ja 2035 erillisinä mallinnuksina tienvarsi- ja terminaalihaketukselle sillä oletuksella, että käyttökohteille suuntautuu vuotuisen toimitusmäärän eli kapasiteetin verran metsähaketta kyseisellä tuotantoketjulla. Yhteensä tarkasteltavia tuotantomalleja muodostui neljä kappaletta: tienvarsihaketuskallit ja terminaalihaketuskallit vuosille 2009 ja 2035. Tuloksissa oleva materiaalivirta perustuu optimaalisimpiin reitteihin metsästä laitokselle. Päijät-Hämeen ulkopuolella olevaa metsähakepotentiaalia tai käyttökohteita ei ole huomioitu selvityksessä.

### **6.5.1 Kestävyyvaikutusten arviointi paikkatietopohjaisen logistiikkamallin avulla**

Metsähakkeen tuotannon logistiikkamallin avulla on mahdollista arvioida kestävyyvaikutuksia niin sosiaalisen, taloudellisen kuin ekologisen kestävyyden näkökulmasta. Logistiikkamallin materiaalivirta on linkitetty kuljetukseen tiestöllä, minkä perusteella tiedetään, kuinka paljon metsäenergiaa kulkee milläkin tieosuudella. Ekologisen kestävyyden vaikutuksia arvioidaan tiestön kokonaiskäytön avulla. Taloudellista kestävyyden vaikutuksia lasketaan niin tiestön kuormittavuuden näkökulmasta kuin metsähakekuljetuksen esteiden kautta. Sosiaalista kestävyyttä arvioidaan tiestön kuormittavuuden ja onnettomuusaineiston avulla.

Osana taloudellisen kestävyyden arviointia tarkasteltiin metsähakekuljetuksen esteiden (ks. s. 34) sijoittumista kartalla ja esteiden sijoittumista toisiinsa nähden *Hot Spot* -analyysin avulla. (ESRI 2013d). Kyseisellä menetelmällä on mahdollista etsiä aineistosta alueita, joissa joudutaan käyttämään todennäköisemmin metsähakekuljetuksien osalta kiertotietä tai toisaalta todennäköisesti vähemmän kiertotietä. *Hot Spot* -analyysijä tehtiin esteille yhteensä kolme: analyysi kaikille metsähakekuljetuksen esteille Päijät-Hämeessä ja analyysit ajoneuvo kielletty- ja suljetun yhteyden esteluokille. Tarkastelu tehtiin kahdelle yleisimmälle esteluokalle erikseen, koska haluttiin selvittää onko esteluokkien välillä eroa spatiaalisessa sijoittumisessa. Hakekuljetusesteille herkkiä alueita tarkasteltiin yhdessä logistiikkamallin

tulosten kanssa, jolloin voidaan havaita mahdollisia riskialueita taloudellisen kestävyysnäkökulmasta.

Liikenneonnettomuusaineistoissa on käytetty liikenneviraston ylläpitämää aineistoa. Analyysissä on vuoden 2012 kaikki liikenneonnettomuudet. Nämä on summattu kilometri kerralla kilometri ruutuihin visuaalisemman tuloksen saamiseksi. Onnettomuuksista on tehty myös *Hot Spot* -analyysi, jota on mahdollista käyttää liikenneonnettomuusalttiiden alueiden löytämiseksi. Vertaamalla tätä aineistoa logistiikkamallin mukaisiin tuloksiin, voidaan havaita mahdollisia riskialueita sosiaalisen kestävyysnäkökulmasta onnettomuusriskin kasvuna. Sekä kuljetusten esteistä että liikenneonnettomuuksista tehtyjen *Hot Spot* -analyysien merkitsevyydeltään on käytetty p-arvoa 0,01 eli virheen todennäköisyys hot spotin löytämisessä on tällöin yksi prosentti.

## **6.6 Metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten laskeminen ToSIA-työkalulla**

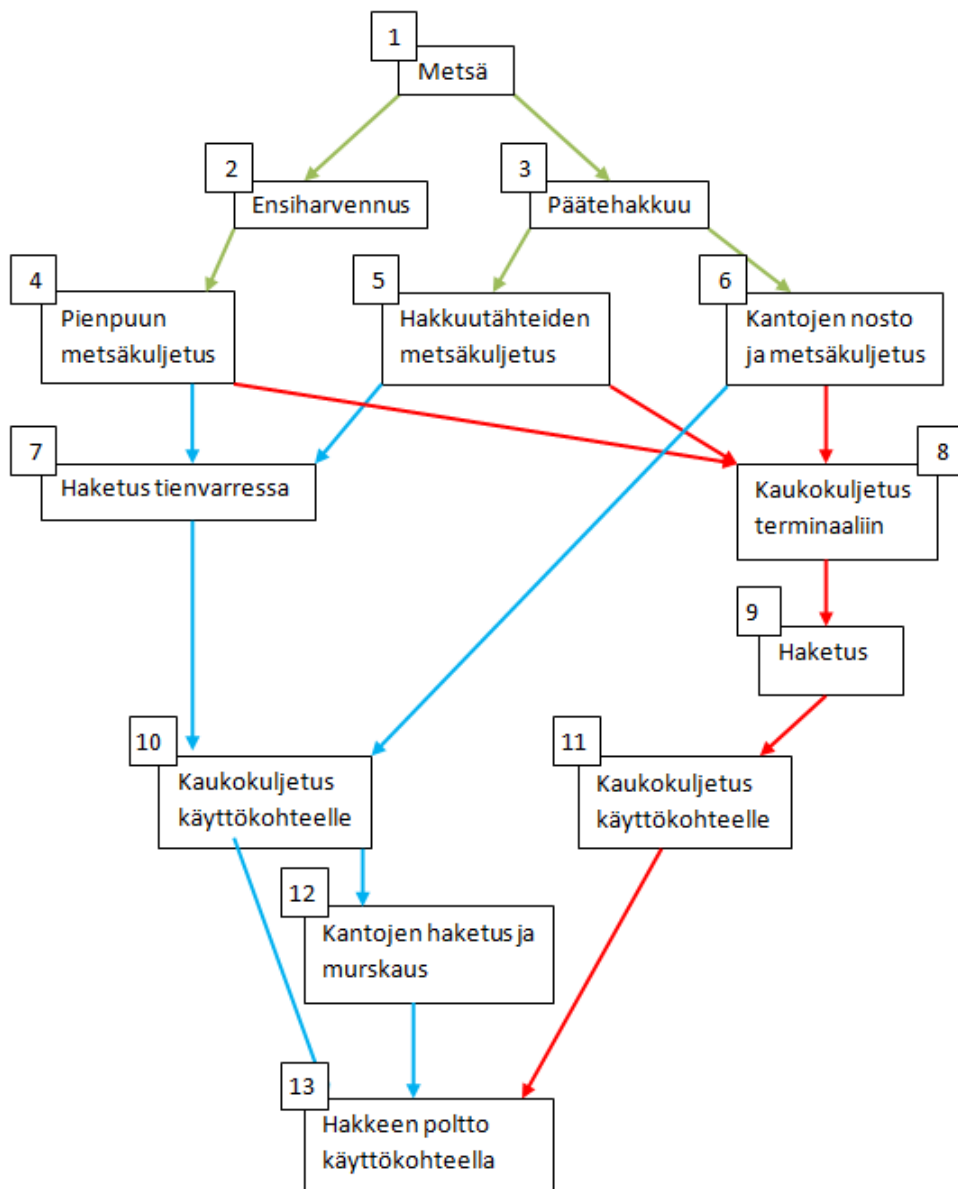
Kestävyysvaikutusten laskemisessa on käytetty alun perin EFORWOOD-projektissa, sittemmin Euroopan metsäinstituutin Northern ToSIA-projektissa kehitettyä ToSIA-työkalua. Kyseinen työkalu soveltuu hyvin metsähakkeen tuotannon mallintamiseen, koska se on nimeltään metsäalan tuotantoketjujen mallintamiseen tehty työkalu. ToSIA-työkalua on käytetty metsähakkeen tuotantoketjujen mallintamiseen myös aikaisemmin. Den Herderin ym. (2012) artikkelissa on tutkittu metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutuksia Pohjois-Karjalan alueella ToSIA-työkalun avulla. Lisäksi on selvitetty eri raaka-aineiden vaikutuksia tuotannon kestävyysvaikutuksiin ja vertailtu muun muassa raskaan polttoöljyn ja metsähakkeen tuotannon kestävyysvaikutusten eroja.

ToSIA-työkalun avulla on tarkasteltu tienvarsihaketuksen ja terminaalihaketuksen tuotantoketjujen kestävyysvaikutusten eroavaisuuksia. Kestävyysvaikutusten eroavaisuuksia on tutkittu neljän tuotantomallin avulla eli metsähakkeen tuotantoa kahdella eri tuotantomenetelmällä vuosina 2009 ja 2035. Tarkemmat lähtöarvot tuotantoketjujen mallintamiseen molemmille vuosille ovat taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Päijät-Hämeen metsähakkeen tuotannon lähtöaineisto ToSIA-työkaluun energiapuulajikkeittain sekä ennustetut arvot vuoden 2035 skenaarioon (Laitila ym. 2008; Anttila ym. 2009; Kärhä ym. 2009; Liimatainen 2010; Rantala 2011).

Prosessit	Määrä	yksikkö
<b>Metsävarat</b>		
Pienpuun korjuuala 2009	2055	ha
Maksimaalinen pienpuun korjuuala	3614	ha
Hakkuutähteiden korjuuala 2009	1939	ha
Maksimaalinen hakkuutähteiden korjuuala	2670	ha
Kantopuun korjuuala 2009	840	ha
Maksimaalinen kantopuun korjuuala	1571	ha
<b>Materiaali</b>		
Pienpuu 2009	56680	m <sup>3</sup>
Pienpuu 2035	62988	m <sup>3</sup>
Hakkuutähteet 2009	50120	m <sup>3</sup>
Hakkuutähteet 2035	93396	m <sup>3</sup>
Kannot 2009	30400	m <sup>3</sup>
Kannot 2035	60816	m <sup>3</sup>
<b>Energian tuotanto</b>		
Energiantuotanto 2009	274400	MWh
Energiantuotanto 2035	434400	MWh

Kestävyysvaikutusten laskemisessa ensimmäisenä määritetään ToSIA:ssa metsähakkeen tuotantoketju Päijät-Hämeen alueelle eli lasketaan materiaalivirta, jota käytetään kestävyysvaikutusten mallintamisessa. Siinä lasketaan pienpuun, hakkuutähteen ja kantojen materiaalivirran avulla kestävyysvaikutukset metsähakkeen eri tuotantomalleille. Kuvassa 18 on tarkemmin kuvattuna rakennettu tuotantoketju metsähakkeen materiaalivirtaa Päijät-Hämeessä. Tuotantoketjusta on pyritty luomaan mahdollisimman selkeä systeemikuvaus, jotta tienvarsihaketuksen ja terminaalihaketuksen tuotantoketjujen kestävyysvaikutusten vertailu olisi mahdollisimman helposti tulkittavissa.



**Kuva 18.** Metsähakkeen tuotannon ketju tienvarsi- ja terminaalihaketukselle. Prosessit on numeroituna tuotantoketjussa. Vihreällä nuolella on kuvattu ne prosessit, jotka ovat samoja molemmissa tuotantoketjuissa. Sinisillä nuolilla on kuvattu tienvarsihaketuksen prosessit ja kantojen materiaalivirta kantojen noston jälkeen. Kuvan tuotantoketju on rakennettava, jotta ToSIA-työkalulla voidaan analysoida materiaalivirtojen kestävyysvaikutuksia.

Taulukossa 4 on kuvattuna tuotantoketjun eri prosessien tarkemmat laskennassa käytetyt oletukset. Prosessien oletukset perustuvat indikaattoreiden arvojen laskennan taustalla oleviin lähtötietoihin, jotka vaikuttavat huomattavalla tavalla indikaattoriarvoihin ja sitä kautta tuotantoketjujen kestävyysvaikutusten tuloksiin. Tässä tutkielmassa on pyritty luomaan yhtenäiset prosessien taustalla olevat oletukset, jotta tuloksista tulisi vertailukelpoisia kaikilla kestävyysvaikutusten mittareilla.

**Taulukko 4.** Prosessien oletukset tuotantoketjuissa (vrt. kuva 18).

Prosessi	Oletus
1	Rantalán (2011) mukaan pienpuun pinta-ala on vuonna 2009 2055 ha. Maksimaalinen pinta-ala on 3614 ha, jota on käytetty myös vuoden 2035 skenaariossa. Hakkuutähteen ja kantojen kapasiteetti energiapuuksi on yhteensä 2779 ha vuodelle 2009. Maksimaalinen pinta-ala on 4241 ha, jota on käytetty myös vuoden 2035 skenaariossa.
2	Pienpuuta on käytetty energiapuuksi vuonna 2009 56680 m <sup>3</sup> (Koisti 2011). Vuoden 2035 arvio on 62988 m <sup>3</sup> . Se pohjautuu Kärhän ym. (2009) arvioon vuonna 2020 käytettävien energiapuulajikkeiden prosentuaalista osuuksista ja Metlan maksimaaliseen potentiaaliin (Laitila ym. 2008; Anttila ym. 2009).
3	Vuonna 2009 käytettiin hakkuutähteitä 50120 m <sup>3</sup> (Koisti 2011). Vuoden 2035 arvio 93396 m <sup>3</sup> pohjautuu arvioon vuonna 2020 käytettävien metsähakemateriaalien prosentuaalista osuuksista ja Metlan maksimaaliseen potentiaaliin (Laitila ym. 2008; Anttila ym. 2009; Kärhä ym. 2009).
4	Pienpuun metsäkuljetuksessa tienvarteen etäisyyden oletus on 220 m (Kariemi 2009).
5	Hakkuutähteen keräyksessä ja kuljetuksessa tienvarteen metsäkuljetuksen etäisyyden oletuksena on käytetty 250 m (Kariniemi ym. 2009).
6	Kantojen nostossa ja kuljetuksessa tienvarteen etäisyyden oletuksena on käytetty 250 m. Vuonna 2009 käytettiin 30400 m <sup>3</sup> kantoja. Vuoden 2035 oletuksena 60816 m <sup>3</sup> pohjautuu Kärhän ym. (2009) arvioon vuonna 2020 käytettävien metsähakemateriaalien prosentuaalista osuuksista ja Metlan maksimaaliseen potentiaaliin (Laitila ym. 2008; Anttila ym. 2009).
7	Haketus tienvarressa.
8	Kaukokuljetuksessa terminaaliin on käytetty paikkatietomenetelmillä saatuja tuloksia kuljetusmatkojen optimoinnissa. Vuoden 2009 keskiarvoinen kuljetusmatka on 12,6 km ja vuoden 2035 17,5 km.
9	Haketus terminaalissa.
10	Kaukokuljetuksessa käyttökohteelle on käytetty paikkatietomenetelmillä saatuja tuloksia kuljetusmatkojen optimoinnissa. Vuoden 2009 keskiarvoinen kuljetusmatka on 17 km ja vuoden 2035 18,2 km.
11	Terminaalihaketuksen jälkeisessä kuljetuksessa käyttökohteelle on käytetty paikkatietomenetelmillä saatuja tuloksia kuljetusmatkojen optimoinnissa. Vuoden 2009 keskiarvoinen kuljetusmatka on 31,7 km ja vuoden 2035 24,4 km.
12	Kantojen haketus ja murskaus käyttökohteella.
13	Hakkeen poltto käyttökohteella.

### 6.6.1 Indikaattorit ToSIA-työkalussa

Tuotannon kestävyysvaikutuksia tutkitaan ToSIA:lla prosessien kestävyysindikaattorien avulla. Tässä selvityksessä käytettävät tuotannon kestävyysvaikutuksia mittaavat indikaattorit on kehitetty EFORWOOD-projektissa (Pülzl ym. 2012). Pohjois-Karjalan maakuntaliiton (2009) laatimassa Pohjois-Karjalan ilmasto- ja energiaohjelmassa on käyty sidosryhmäkeskusteluja eri toimijoiden välillä parhaista kestävyysvaikutusten mittareista ja päädytty samoihin indikaattoreihin ToSIA-työkalussa kuin tässä tutkielmassa käytetään. Pohjois-Karjalassa käytettyjä indikaattoreita voidaan pitää hyvin soveltuvana myös Päijät-Hämeen tuotantoketjujen kestävyysvaikutusten arviointiin.

Taloudellisen kestävyuden indikaattorina ToSIA-työkalussa on käytetty tuotantokustannuksia ja yksikkönä euroa megawattituntia kohden. Haketuksen prosessien tuotantokustannusten indikaattorit perustuvat Ihalaisen & Niskasen (2010) artikkelissa käytetyille terminaalihaketuksen ja tienvarsihaketukselle arvoille energiapuulajikkeittain. Kantojen noston ja metsäkuljetuksen indikaattoriarvot on laadittu Laitila ym. (2007) työraportin tuloksista. Pienpuun ja hakkuutähteen muiden prosessien osalta indikaattoriarvoja on laadittu Ihalainen & Asikainen (2010) ja den Herder ym. (2012) artikkeleiden perusteella. Kaukokuljetuksen osalta tuotantokustannusten indikaattoriarvona on käytetty Chesneau ym. (2012) kuljetustyökalulla saatuja tuloksia. Paikkatietomenetelmillä on laskettu optimaalisimmat kaukokuljetusreitit tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotantoketjuille. Näitä matkoja käytetään Chesneau ym. (2012) kuljetustyökalussa kuljetusmatkoina, missä optimoitujen kuljetusmatkatietojen avulla voidaan vertailla eri kaukokuljetusreittien vaikutusta tuotantoketjun kestävyysvaikutuksiin. Chesneau ym. (2012) työkalun tuloksia on tarkennettu, koska hakekuljetukseen mahtuu enemmän kuutioita kuin hakkuutähteen, kantojen tai pienpuun kuljetuksessa. Työkalussa laskenta perustuu vain kuljetukseen hakkeena. Tuloksia on tarkennettu Laitilan ym. (2012: 180) artikkelissa käytetyillä arvoilla kaukokuljetuskuormista eri energiapuulajeittain. Laskennassa verrattiin hakkeen ja energiapuun kaukokuljetuksen kuutiomääriä toisiinsa, minkä avulla laskettiin kuinka paljon enemmän hakkeena on mahdollista kuljettaa verrattuna energiapuun kuljetuksiin.

Sosiaalisen kestävyuden indikaattorina on käytetty työllisyysvaikutusta. Työllisyysvaikutus kuvataan henkilötyövuosina eri tuotantomallien osalle. Tutkielmassa tarkastellaan



työllisyyden osalta myös työllistävyttä megawattituntia kohden. Työllisyysvaikutuksen indikaattorien arvot on laskettu pienpuun ja hakkuutähteen osalta Ahosen (2004) ja Paanasen (2005) artikkeleiden perusteella. Artikkelien tutkimusalueet sijoittuvat Keski- ja Länsi-Suomeen, mutta nämä sopivat hyvin indikaattoreiksi myös Päijät-Hämeen alueelle. Kantojen noston ja haketuksen osalta on käytetty Kärhän ym. (2009) tekemää selvitystä metsähakkeen tuotannon resurssitarpeesta vuonna 2020. Kaukokuljetuksen osalta on käytetty tuotantokustannusten tapaan Chesneau ym. (2012) kuljetustyökälyä.

Ekologista kestävyttä arvioidaan kasvihuonekaasupäästöjen indikaattorin avulla. Indikaattorilla vertaillaan myös metsähakkeen tuotannon ja raskaan polttoöljyn tuotannon kasvihuonekaasupäästöjen eroja. Yksikkönä käytetään kg hiilidioksidiekvivalenttia (CO<sub>2</sub>-ekv.) Hiilidioksidiekvivalentti kertoo kaasujen lämmityspotentiaalın sadan vuoden aikana. Laskennassa on käytetty IPPC:n hyväksymiä määritelmiä Global Warming Potential - kertoimille, jotka ovat hiilidioksidi 1, metaani 23 sekä typpioksiduuli 296 (Eggleston 2006). Kasvihuonekaasupäästöt on laskettu Kariniemen (2009) artikkelin perusteella kummallekin tuotantoketjuille. Artikkelissa on määritetty kasvihuonekaasupäästöt Suomen tasolla eri prosesseille, mutta näiden arvojen voidaan olettaa olevan samoja Päijät-Hämeen alueella. Kaukokuljetuksen osalta kasvihuonekaasujen indikaattoriarvoissa on käytetty tuotantokustannusten ja työllisyysvaikutusten tapaan Chesneau ym. (2012) kuljetustyökälyä. Tarkemmat prosessien indikaattoriarvot jokaiselle kestävyysvaikutusmittarille ovat liitteessä 5.

## **6.7 Menetelmien luotettavuuden arviointi**

Tutkimuksen luotettavuutta voidaan tarkastella neljän eri luokan avulla (Yin 2003). Rakenteellisella validiteetilla tarkoitetaan käsitteen oikeanlaista mittausta sopivalla indikaattorilla. Rakenteellista validiutta on mietitty tässä tutkielmassa aikaisemmin käytettyjen tutkimusmenetelmien ja käsitteen mittaustapojen perusteella. Rakenteellinen validiteetti on erityisen haastava monimutkaisissa avoimissa systeemianalyyseissä (Ratinen 2005). Tässä tutkimuksessa on pyritty luomaan mahdollisimman yksinkertainen systeemi kuvaamaan Päijät-Hämeen tilannetta, jotta mallinnuksessa pystytään huomioimaan mahdollisimman tarkasti tutkittavat näkökulmat.

Ratisen (2005) mukaan sisäisen validiteetin eli todellisen syys-seuraussuhteen huomioon ottaminen on mahdollista tarkalla rakenteellisen validiteetin pohdinnalla. Kun mietitään tarkasti käytettyjen käsitteiden mittaustavat, on mahdollista huomioida myös paremmin sisäistä validiteettia. Ulkoinen validius eli tulosten yleistettävyys metsähakkeen systeemin mallintamisessa on hieman ongelmallisempaa, tutkittavan tuotannon paikallisista erityispiirteistä johtuen. Suomen tasolla menetelmä on mahdollista yleistää, mutta Suomen ulkopuolella täysin samalla menetelmällä tutkiminen on melko ongelmallista kunkin alueen erityispiirteistä johtuen. Menetelmien yleistettävyys on kuitenkin mahdollista räätälöimällä menetelmät paikallisiin olosuhteisiin sopiviksi.

Reliabiliteetilla tarkoitetaan tutkimuksen toistettavuutta, tutkimuksen pitäisi pystyä toistamaan myös muu kuin tutkimuksen tekijä saaden samat tulokset (Yin 2009). Reliabiliteettiin on kiinnitetty erityisesti huomiota tässä pro gradussa. Aineiston keräämisessä on pyritty keräämään uusin ja luotettavin aineisto aihepiiriin liittyen. Menetelmillä on tehty useita ajoja virheiden etsimiseksi erityisesti ToSIA-työkalulla, minkä avulla on pystytty havaitsemaan puutteita ja parantamaan niitä käytetyissä muuttujissa vertaamalla tulosten oikeellisuutta aihepiiriin muihin tutkimuksiin.

## 7 Asiantuntijahaastatteluiden tulokset

### 7.1 Metsähakkeen tuotanto Päijät-Hämeessä

Haastateltavien mukaan metsähakkeen käyttö on lisääntynyt 2000-luvun loppupuolella valtavasti, sittemmin kehitys on hieman tasaantunut. Päijät-Hämeessä on lähdetty myöhään liikkeelle, mutta sen jälkeen rysäyksellä. Vuosien välillä on isoja heilahteluja metsähakkeen käytön suhteen esimerkiksi keliolosuhteiden takia. Haastateltavien perusteella hakkeen tuotannosta kulkeutuu jopa noin kolme neljäsosaa alueen ulkopuolelle eli vain yksi neljäsosa tuotannosta käytetään Päijät-Hämeessä. Samankaltaisia lukemia on saatu myös Liimataisen (2010) tekemässä selvityksessä metsähakkeen korjuusta Päijät-Hämeessä.

Haastateltavat olivat melko yksimielisiä (yhdeksän kymmenestä), että metsähakkeen tuotanto tulee lisääntymään. Esimerkkivastaus kuvastaa melko tyypillistä käsitystä tulevasta kehityksestä: *"Käyttö tulee lisääntymään Päijät-Hämeessä selkeästi, nähdään lähienergian myönteiset vaikutukset ja sitä kautta kotimaisen energian monipuoliset vaikutukset talouteen."*

Metsähakkeen tuotannon lisäämisen kannalta muuttuvia tekijöitä on kuitenkin paljon, jotka vaikuttavat oleellisesti tuotannon kehittymiseen. Tulevaisuudessa terminaalihaketuksen tuotantoketjun osuuden uskotaan kasvavan, jopa yli puoleen hakkeen kokonaistuotannosta. Tievarsihaketuksen uskotaan kuitenkin pysyvän vaihtoehtoisena tuotantoketjua, koska aina ei kannata kuljettaa terminaaliin asti. Yhdeksän haastateltavaa kymmenestä oli sitä mieltä, että metsähakkeen tuotannon kehittymiseen Päijät-Hämeessä vaikuttaa kysyntä ja sitä kautta käytön näkymät: *"Metsähakkeesta kiinnostava ja kilpailukykyinen polttoaine. Sitä kautta tulee kysyntää ja sitä kautta tuotanto kehittyy."* Muita tuotannon kehittymiseen vaikuttavia tekijöitä mainittiin useita. Energiapuun hinta nähtiin keskeisenä tekijänä kehittymiseen, tähän liittyy kiinteästi myös valtion tukipolitiikka energiapuun käytölle. Lisäksi teknologian kehittyminen ja metsänomistajien metsän myyntihalukkuus koettiin tärkeiksi tekijöiksi useissa vastauksissa.

Päijät-Hämeen alueella metsähakkeen käytön uskotaan keskittyvän yhä enemmän Lahden seudulle, koska seutu on kasvavaa aluetta ja muualla maakunnassa on uusia vasta valmistuneita lämpölaitoksia, esimerkiksi Orimattilassa, Hämeenkoskella, Padasjoella, Sysmässä ja Kärkölässä. Hennan alueelle arveltiin tulevan metsähakkeen käyttöä tulevaisuudessa, jos alue kehittyy suunnitelmien mukaisesti. Metsähakkeen tuotantoa pystytään lisäämään kestäväällä tavalla haastatteluiden mukaan noin puolella nykytilanteesta. Vastauksissa esiintyi kuitenkin paljon eroavaisuuksia lisäämisen mahdollisuuksista kestäväällä tavalla.

## **7.2 Metsähakkeen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutukset**

Haastattelujen perusteella metsäenergian työllisyysvaikutukset nousivat tärkeimmäksi tuotannon kestävyysvaikutukseksi. Sosiaalisen kestävyuden osalta myös varastojen purku nähtiin sosiaalisena ongelmana onnettomuusriskin vuoksi. Taloudellisen ja ekologisen kestävyuden kannalta tuli monipuolisesti vastauksia. Tuotannon kannattavuus taloudelliselta puolelta ja ravinnehävikki ekologiselta puolelta nousivat esiin keskeisimpinä näkökulmina. Monimuotoisuus ei noussut keskeisenä näkökulmana ekologissa kestävyudessa. Tätä saattaa selittää, että monimuotoisuuden ylläpitämistä pidetään itsestään selvänä asiana, koska monimuotoisuutta turvataan tuotannossa välttämällä ekologiselle kestävyydelle haitallisia alueita.

Tienvarsihaketuksen ja terminaalihaketuksen tuotantoketjujen keskeisimpinä eroina kestävyysvaikutuksissa ilmeni, että terminaalihaketuksen tuotantoketju tuo varmuutta tuotantoon. Tällä tarkoitetaan sitä, että erityisesti kelirikkoaikana terminaalista voidaan kuljettaa haketta laitokselle, vaikka pienemmät tiet eivät kantaisi kuljetusta. Toisaalta tienvarsihaketus on hieman halvempi keino tuottaa, koska terminaalihaketuksessa tulee yksi prosessi lisää tuotantoketjuun. Terminaalien nähtiin parantavan työllisyysvaikutuksia, koska kuljetus tasaantuu paremmin vuoden sisällä. Ekologisen kestävyuden näkökulmasta tienvarsihaketus nähtiin hieman parempana, koska tuotantoketjussa on vähemmän kuljetusta ja sitä kautta vähemmän hiilidioksidipäästöjä.

Kysyttäessä keinoja metsähakkeen kestävämpään tuottamiseen, kaksi asiaa nousi esiin tärkeimpänä. Ensinnäkin kuljetusmatkoja tulisi lyhentää eli vähentää turhaa ajamista. Tähän

ehdotettiin ratkaisuna yritysten välisiä vaihtokauppoja, jolloin energiapuu tai hake voitaisiin ajaa lähimpään käyttökohteeseen. Toisena tekijänä oli synergiaetujen muodostuminen tuotantoketjuihin. Metsähakkeen tuotannon yhdistäminen sellun ja tukkipuun tuotantoon parantaa tuotannon kestävyyttä. Muita tekijöitä kestävyysvaikutuksien vähentämiseen nähtiin muun muassa teknologian kehittyminen.

Metsähakkeen tuotannon lisäämisen vaikutukset metsäsektorin tuotannon kestävyteen nähtiin varsin positiivisena tekijänä. Erityisesti työllisyyden kasvu nähtiin keskeisenä seurauksena metsähakkeen tuotannon kasvuille. Toisaalta vastauksissa nousi esille, että hakkeen tuotannon lisäämisessä pitää huomioida myös muut kestävyysvaikutukset. Lisäämisen tulee tapahtua siis metsähakepotentiaali huomioon ottaen.

Haastateltavien mukaan metsähakkeen tuotannossa tulee kiinnittää huomiota seuraaviin alueisiin: hiljaiset alueet, asutusalueet ja luonnonsuojelualueet. Lahti nähtiin suurimpana logistiikan ongelmakohtana, Kymijärven ollessa logistiikan hermokeskus Päijät-Hämeessä. Muutenkin logistiikasta johtuvat ongelmakohdat sijoittuvat käyttökohteiden välittömään läheisyyteen. Tiestön osalta ongelmana nähtiin Päijät-Hämettä halkova valtatie 12, tien ruuhkaisuuden takia. Ongelmia on myös alemmanasteisilla tieverkoilla, koska raskas rekkaliikenne kuormittaa paljon teitä erityisesti kelirikon aikana: *”Iso ongelma on kelirikkoajat ja teiden kestävyys siihen aikaan.”* Tuotanto lähtee kuitenkin joka tapauksessa pieniltä metsäteiltä. Järvet aiheuttavat puolestaan katkosta poikittaisliikenteen, mikä on muutenkin heikkoa Päijät-Hämeessä. Ongelmallisena alueena voidaan nähdä myös maakunnan syrjäiset alueet, jossa on paljon metsää, mutta vähän käyttökohteita. Tämä aiheuttaa kuljetusmatkojen pitenemistä väkisinkin.

### **7.3 Metsähaketerminaalien sijoittelu**

Haastatteluiden perusteella merkittävimmäksi tekijäksi metsähaketerminaalien sijoittelussa nousi terminaalin optimaalinen sijainti käyttökohteeseen nähden. Tärkeäksi koettiin myös tiestön asema terminaaliin nähden. Terminaalin tulisi sijaita hyvien liikenneyhteyksien varrella, esimerkiksi lähellä pääteiden liittymiä.

Asiantuntijoiden mukaan muita huomioitavia tekijöitä terminaalien sijoittelussa ovat:

- *Maanpinnan asfaltoitavuus*
- *Asutuksen sijainti terminaaliin nähden*
- *Alueen luonne esim. teollisuusalueelle terminaali sopii paremmin kuin asutusalueelle*
- *Hajuhaitat*
- *Kaavoitus*
- *Kilpailutilanne*
- *Melu- ja pölyvaikutukset*
- *Pohjavesialueet*
- *Rautateiden läheisyys*
- *Terminaalin perustamiskustannukset*
- *Ympäristöluvut*

Kysymys ison terminaalin kokonaisuuden vai useamman pienemmän terminaalien kannattamisessa jakoi mielipiteitä melko paljon. Toisaalta kannatettiin ison terminaalin kokonaisuutta paremman tehokkuuden ja tuottavuuden vuoksi, mutta isossa terminaaleissa nähtiin myös ongelmia esimerkiksi alueiden saatavuutta ja lupaprosessia hidastavana tekijänä. Isossa terminaalissa mietitytti se, kuka lähtee toimijaksi terminaaliin, sillä aloituskustannukset nousevat suuriksi isomman luokan terminaaleissa. Kuljetuskustannukset kasvavat, jos käytössä on vain yksi iso terminaali. Ison terminaalin rinnalle nousi sekamuoto, jossa olisi pienempiä terminaaleita sopiva määrä ja ehkä yksi isompi terminaali näiden lisäksi. Vastausten analysointia vaikeutti se, että jotkut saattavat nähdä ison terminaalin erikokoisena kuin toiset. Haastattelussa ei ollut määriteltynä kokokriteeriä isolle terminaalille.

Metsähaketerminaalien sijoittaminen maankäsittely- ja jätteenkäsittelypaikkojen yhteyteen nähtiin lähtökohtaisesti yksimielisesti myönteiseksi asiaksi. Tällöin vaihtoehdoksi nähtiin kuitenkin vain yksi alueellinen isompi laitos, jossa toiminnot olisivat yhdistettynä. Keskittämisessä tulee huomioida myös terminaalien sijoittelussa esiin nousseet näkökulmat.

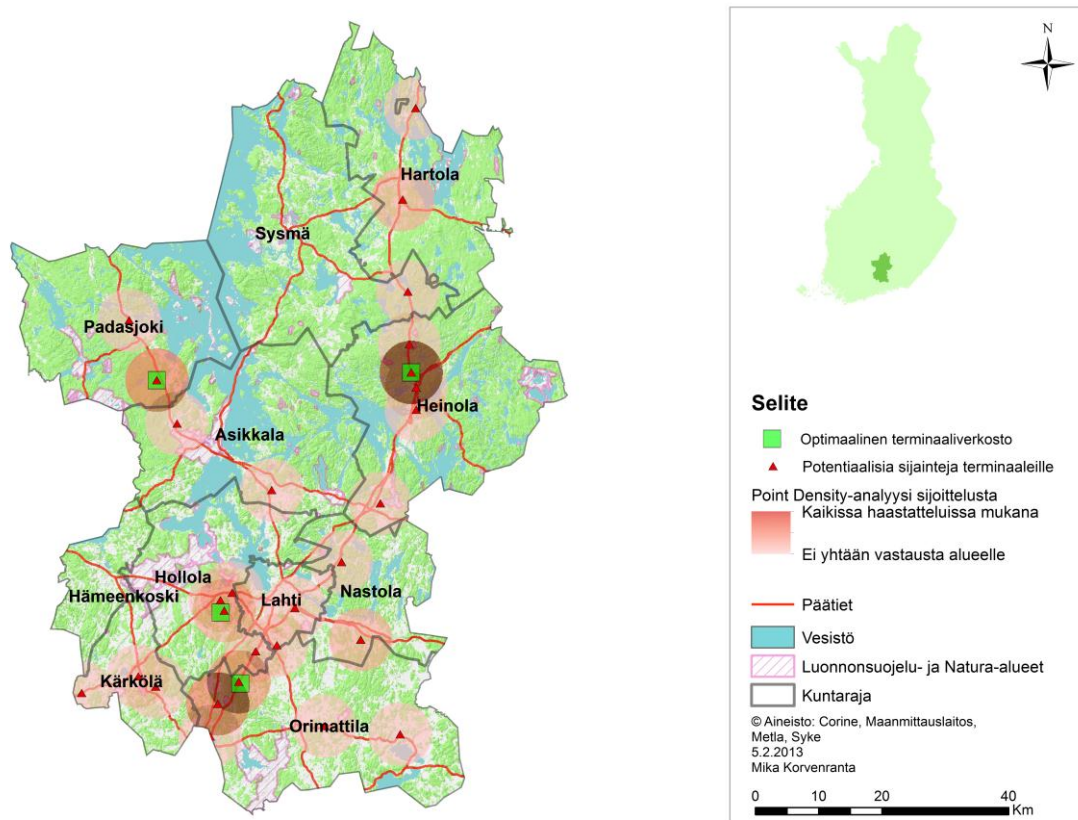
Haastattelujen perusteella keskitetyn ison laitoksen perustamisessa tulee huomioida:

- *Alueiden saatavuuden huomioiminen*
- *Ympäristölupien saaminen*
- *Laadunhallin huomioiminen*
- *Liikenteen huomioon ottaminen*
- *Synergiaedut toiminnoissa esimerkiksi kantojen käsittelystä irtoaa maa-ainesta, joka voitaisiin käyttää hyödyksi. Tuhkan käsittelyn mahdollisuus. Vaa'an yhteiskäyttö terminaalissa. "Toisen sivutuote voi olla toimia toisen raaka-aineena. Useampi laitos tarvitsee myös sähköä ja lämpöä sekä poistovesien käsittelyä, saisi yhdistettyä nämä toiminnot. "*
- *Toimintojen pitäminen erillään*
- *Jatkojalostus yhtenä tekijänä kaikilla materiaaleilla, voitaisiin tuottaa jalostetumpaa materiaalia.*
- *Ympäristö vs. saatu hyöty*

Optimaalisten terminaalien sijoittelussa vastauksia tuli hyvin erilaisia, terminaalien määrän vaihdellessa yhdestä seitsemään terminaaliin Päijät-Hämeen alueelle. Tehtävänä oli suunnitella kartalle optimaalinen metsähaketerminaaliverkosto Päijät-Hämeeseen vuoden 2035 kehitysnäkymiä silmällä pitäen. Metsähakkeen tuotannon arvellaan kasvavan ja terminaalihaketuksen tuotantoketjua hyödynnettävän yhä enemmän tulevaisuudessa. Kaikilla haastateltavilla oli pohjatietona työkartat metsähakepotentiaalista, metsäalaan suhteutettu metsähakepotentiaali sekä käyttökohteista ja kartoitetuista mahdollisista metsähake-terminaalien sijainneista.

Asiantuntija-aineiston *Point Density* -analyysissä erottuivat selvästi neljä eniten sijoitettua aluetta. Optimaaliseksi terminaaliverkostoksi Päijät-Hämeen alueelle voidaan valita nämä neljä analyysissä esiin noussutta aluetta. Kuvassa 19 on nähtävissä asiantuntijoiden esittämä optimaalinen terminaaliverkosto Päijät-Hämeeseen. Korvenranta (2013) on selvittänyt seudullisesti merkittävien materiaalinkäsittelyn terminaalien sijainteja Päijät-Hämeessä. Selvityksessä metsähake oli yksi tärkeimmistä materiaaleista analyyseissä yhdessä ylijäämämaan, rakennusjätteen, jätevesilietteen ja tuhkan ohella. Kyseisessä selvityksessä nousi esiin neljä terminaalien sijoituspaikkaa Päijät-Hämeen maakuntakaavoituksen

tarpeeseen. Asiantuntijahaastattelun tuloksia voidaan pitää samansuuntaisina ja siten luotettavina, sillä materiaalinkäsittelyn terminaalit olivat sijainniltaan lähellä tämän tutkielman tuloksia.



**Kuva 19.** Asiantuntijahaastatteluiden perusteella määritetty optimaalinen terminaaliverkosto. Kuvassa on kaikki potentiaaliset sijainnit terminaalille, mitkä nousivat esiin asiantuntijahaastatteluissa. *Point Density* -analyysissä optimaalinen terminaaliverkosto muodostuu Orimattilan Viljaniemen liittymän, Hollolan Aikkalan, Padasjoen ja Heinolan Lusin terminaalista.



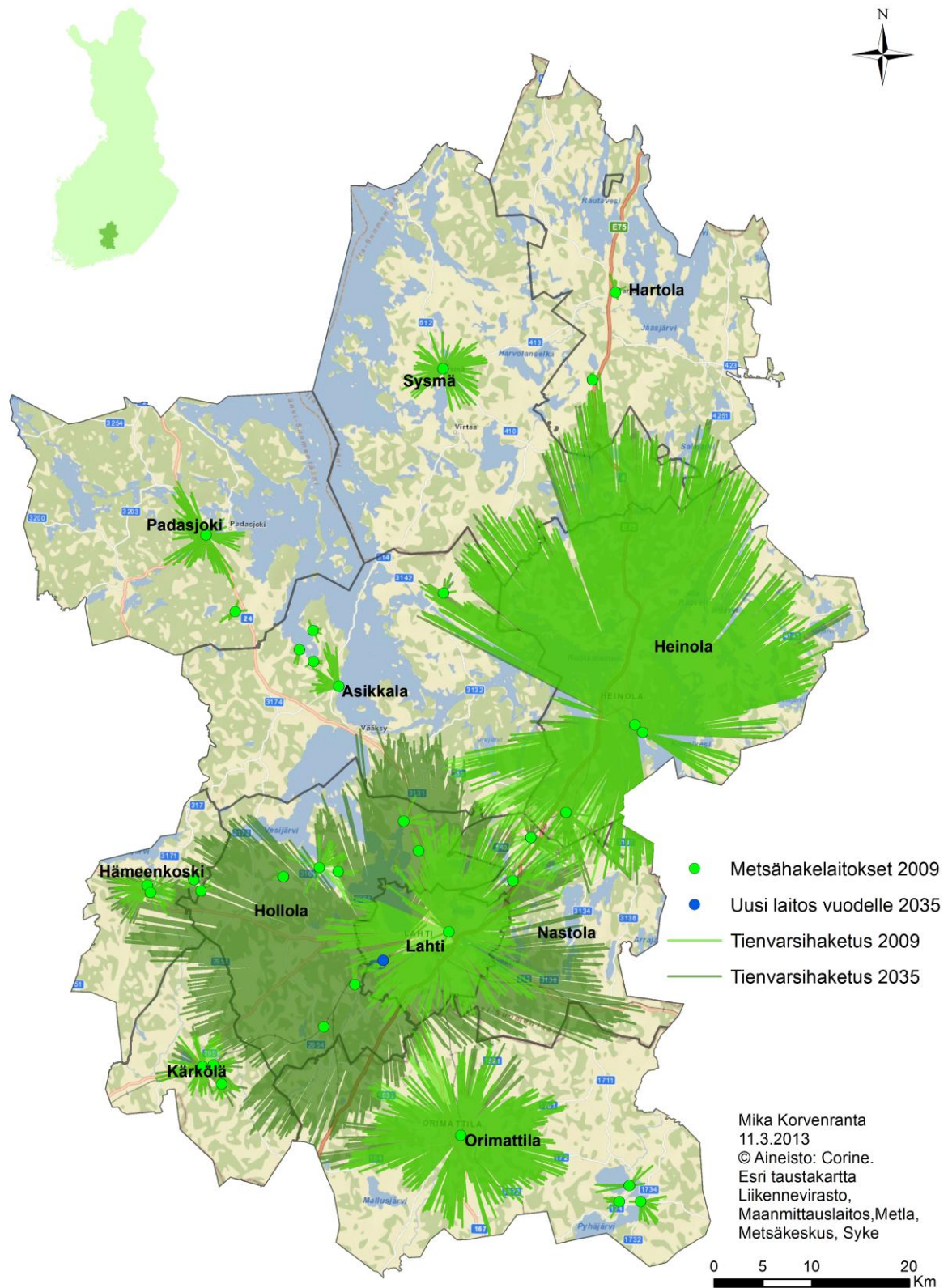
## **8 Paikkatietomenetelmien ja ToSIA:n kestävyysvaikutusten arvioinnin tulokset**

### **8.1 Metsähakkeen tuotannon paikkatietopohjainen logistiikkamalli Päijät-Hämeessä**

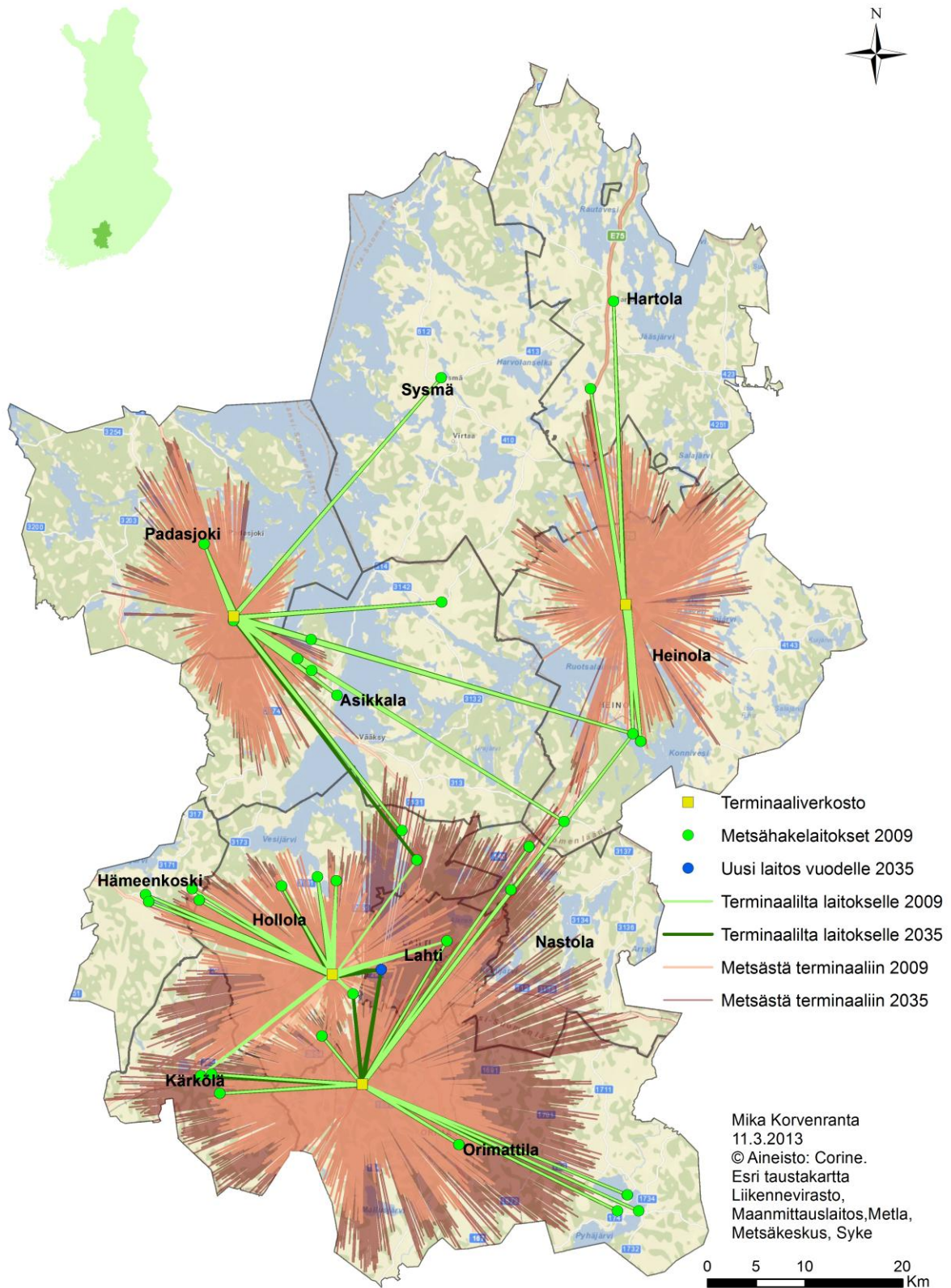
Metsähakkeen tuotannon paikkatietopohjaisessa logistiikkamallissa laskettiin optimaalisin materiaalivirta tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotantoketjuilla vuosille 2009 ja 2035. Malli rajautuu kuljetuksiin tienvarresta metsähakkeen käyttökohteelle (ks. s. 40–42). Optimoinnin perusteella voidaan arvioida metsähakkeen tuotannon lisäämisen vaikutusta logistiikan kestävyYTEEN.

Logistiikkamallin avulla on mahdollista arvioida myös metsähaketerminaalin optimaalista sijaintia ja kokoa eri skenaarioiden avulla. Kuvasta 21 havaitaan, että Padasjoella sijaitsevan terminaalin koko voisi olla pienempi kuin mallinnuksessa on käytetty, sillä sieltä materiaalia kuljetetaan hyvin pitkiä matkoja. Vastaavasti Heinolassa sijaitsevan terminaalin koko voisi olla isompi, jotta se pystyisi tuottamaan materiaalia terminaalin lähellä oleville käyttökohteille.

Mielenkiintoiseksi tulokseksi muodostui materiaalivirran alueellisen jakautumisen muotoutuminen metsähakkeen käytön kasvaessa ennustejaksolla 2009–2035. Tienvarsihaketuksen osalta metsähakkeen korjuu kasvaa erityisesti Hollolan alueella. Vuonna 2009 keskiarvoinen kaukokuljetusmatka optimaalisimmilla reiteillä on 17 kilometriä ja vuonna 2035 18,2 kilometriä (kuva 20). Kuljetusmatkojen eroksi vuosien 2009 ja 2035 välillä muodostui 1,2 kilometriä. Tämä ero vaikuttaa varsin pieneltä siihen nähden, että metsähakkeen käyttö lähes kaksinkertaistui vuodesta 2009 vuoteen 2035. Tuloksesta voidaan päätellä, että vuoden 2035 skenaariossa olevan uuden käyttökohteen lähellä on runsaat metsäenergiavarat ja haketaseen on oltava ylijäämäinen (ks. kuva 10 ja kuva 13).



**Kuva 20.** Metsähakkeen tuotannon optimaalinen materiaalivirta Päijät-Hämeessä tienvarsihaketuksen tuotantoketjuille vuosien 2009 ja 2035 tuotantomalleille.



**Kuva 21.** Metsähakkeen tuotannon optimaalinen materiaalivirta Päijät-Hämeessä terminaalihaketuksen tuotantoketjuille vuosien 2009 ja 2035 tuotantomalleille.

Terminaalihaketuksen osalta korjuun kasvu jakautuu hieman tasaisemmin kuin tienvarsihaketuksessa Päijät-Hämeessä, sillä tuotantoketjussa materiaali kuljetetaan ensin terminaaleihin, jotka sijaitsevat melko keskeisillä paikoilla Päijät-Hämeen alueella. Vuonna 2009 kaukokuljetuksen keskiarvoinen matka metsästä terminaaliin mallilla laskettuna on 12,64 kilometriä, vuonna 2035 matka on 17,5 kilometriä. Kuljetusmatka kasvaa lähes 5 kilometriä eli selvästi enemmän kuin tienvarsihaketuksen osalta. Tämä selittyy sillä, että terminaalihaketuksen tuotantoketjussa kaikki materiaalivirta viedään terminaaleihin, joita mallissa on mukana neljä kappaletta, kun taas tienvarsihaketuksen käyttökohteita on 34. Metsähakkeen käytön kasvaessa kuljetusmäärän kasvu jakaantuu tienvarsihaketuksen osalta alueellisesti tasaisemmin.

Terminaalihaketuksen tuotantoketjussa kuljetusmatkan keskiarvo terminaalista laitokseen on vuonna 2009 31,7 kilometriä ja vuonna 2035 24,3 kilometriä. Voisi kuvitella, että kuljetusmatka olisi vuonna 2035 pidempi, koska materiaalia kuljetetaan enemmän koko alueelta laitoksille. Kuljetusmatkan lyhentymisestä voidaan päätellä terminaalien optimaalista kokoa. Vuoden 2035 skenaariossa Päijät-Hämeen eteläisimmällä terminaalilla (ks. kuva 21) on suurempi rooli metsähakkeen varastona, mikä vaikuttaa merkittävästi kuljetusmatkan lyhentymiseen vuoden 2035 skenaariossa.

Logistiikkamallin luotettavuutta voidaan arvioida tarkastamalla, kuinka todennäköisesti malli laskee materiaalivirran oikein. Oikealla materiaalivirralla tarkoitetaan metsähakkeen käytön määrää vuonna 2009 ja 2035. On mahdollista tarkastaa mallin laskemat viivat kaukokuljetukselle. Esimerkiksi, jos malli on laskenut vuodelle 2009 yhteensä 3428 viivaa, malli ei ole laskenut kaikkea metsähakkeen käyttöä mukaan mallinnukseen, vaan siitä puuttuu 0,06 prosenttia. Taulukossa 5 on kuvattuna logistiikkamallin luotettavuutta kaukokuljetuksen prosessin osalta.

Malli osoittautui hyvin luotettavaksi tällä luotettavuuden tarkastusmenetelmällä. Toki taulukon 5 lukemat eivät kuvaa koko mallin luotettavuutta tarkasti. On olemassa mahdollisuus, että jokin logistiikkamallin materiaalivirtaa kuvaava viiva on mennyt väärälle laitokselle optimoinnissa. Tarkastelin mallin luotettavuutta tältä osin myös satunnaisotannalla usealta laitokselta, mutta näissä tapauksissa työkalu oli laskenut materiaalivirran oikein. Logistiikkamallin luotettavuutta voidaan tarkastaa myös kokeilemalla reitin optimoinnin

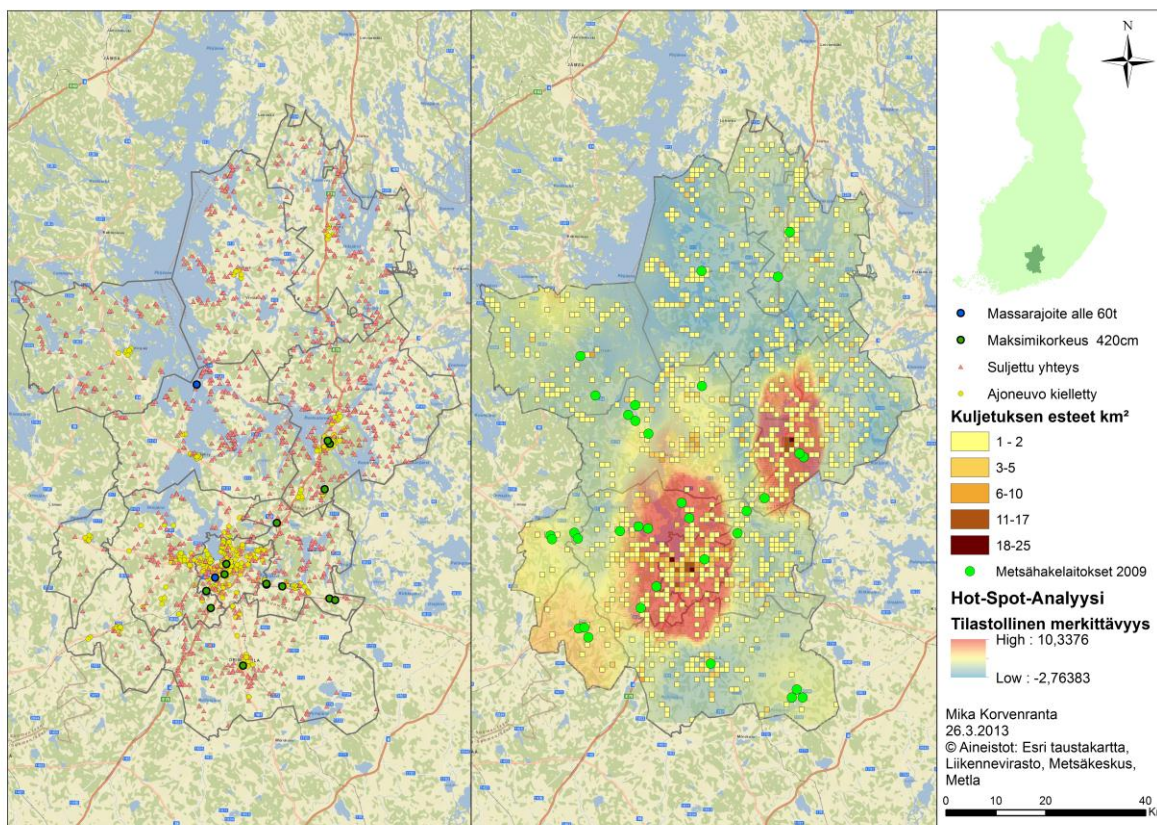
oikeellisuutta samalla liikenneverkkoaineistolla yksinkertaisemmalla analyysillä kuin logistiikkamallissa on käytetty (Mitchell 2012). *Route* -toiminnolla kokeiltuna useilta eri alueilta Päijät-Hämeessä liikenneverkkoaineisto osoittautui toimivaksi pohja-aineistoksi reitin optimointiin.

**Taulukko 5.** Logistiikkamallin menetelmän luotettavuuden arviointia. Keskiarvoisesti menetelmän onnistumisprosentiksi metsähakepotentiaalın ja käytön materiaalivirran osalta muodostui 99,96 prosenttia.

<b>Materiaalivirta</b>	<b>Mallin laskemat viivat</b>	<b>Eroa oikeaan</b>	<b>Mallin onnistumisprosentti</b>
Tienvarsihaketus 2009	3428	2	99,94 %
Tienvarsihaketus 2035	5428	2	99,96 %
Terminaalihaketus 2009 metsästä terminaaliin	3430	0	100 %
Terminaalihaketus 2009 terminaalista käyttökohteelle	3433	3	99,91 %
Terminaalihaketus 2035 metsästä terminaaliin	5430	0	100 %
Terminaalihaketus 2035 terminaalista käyttökohteelle	5426	4	99,93 %

## 8.2 Metsähakkeen tuotannon kuljetuksien esteet

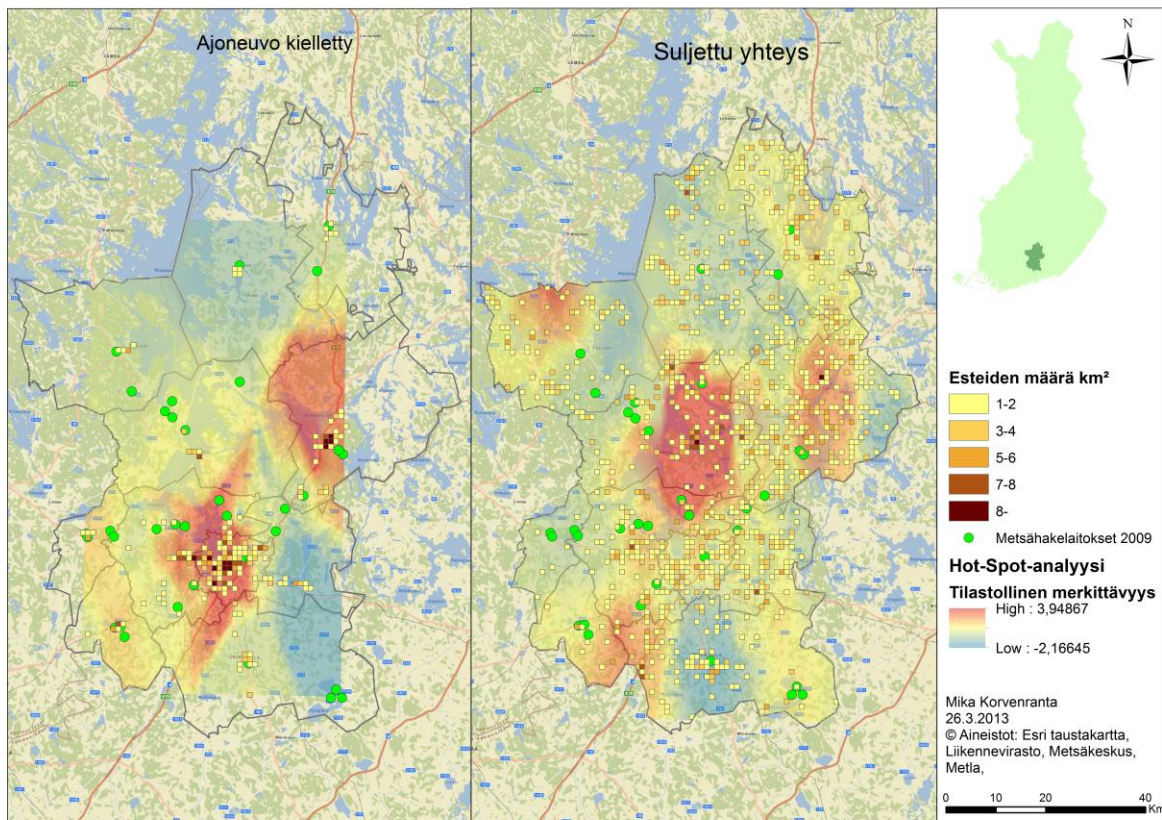
*Hot Spot* -analyysillä on tarkasteltu ensin yhtä tasoa kaikkien esteiden osalta. Tällä aineistolla Lahden ja Heinolan alueet nousivat esiin tilastollisesti merkitsevinä ( $p$ -arvo = 0,01 ja  $z$ -arvo =  $\pm 2,58$ ) kuumina alueina muodostaen riskialueen metsähakekuljetuksien esteiden suhteen. Selkeitä kylmien alueiden keskittymiä ei löytynyt aivan niin selvästi kuin kuumia, mutta Sysmän alueella voidaan todeta olevan vähiten riskialtista metsäenergiakuljetuksien esteille tarkastellessa kaikkia esteitä (kuva 22).



**Kuva 22.** Kaukokuljetuksen rajoitteet tieverkolla. Kuvassa on kaikki metsähakekuljetukseen vaikuttavat esteet Päijät-Hämeessä. Lisäksi on tehty *Hot Spot* -analyysi esteiden sijoittumisesta Päijät-Hämeessä. High ja low arvot ovat testin tuloksia. Tummanpunaisella alueella olevat esteet ovat tilastollisesti merkittävästi klusteroituneita eli esteet ovat siellä lähempänä toisiaan (raja-arvona +2,58). Sinisellä alueella esteet ovat tilastollisesti merkittävästi kauempana toisistaan (raja-arvona -2,58).

Aineistoa on analysoitu myös luokkien ajoneuvo kielletty ja suljettu yhteys osalta. Ajoneuvo kielletty -esteiden osalta aineistossa nousi esiin Lahden ja Heinolan alueet tilastollisesti merkittävänä kuumina alueina. Tämä ei ole kovin yllättävää, sillä metsähakekuljetuksen esteitä on todennäköisesti paljon kaupungissa.

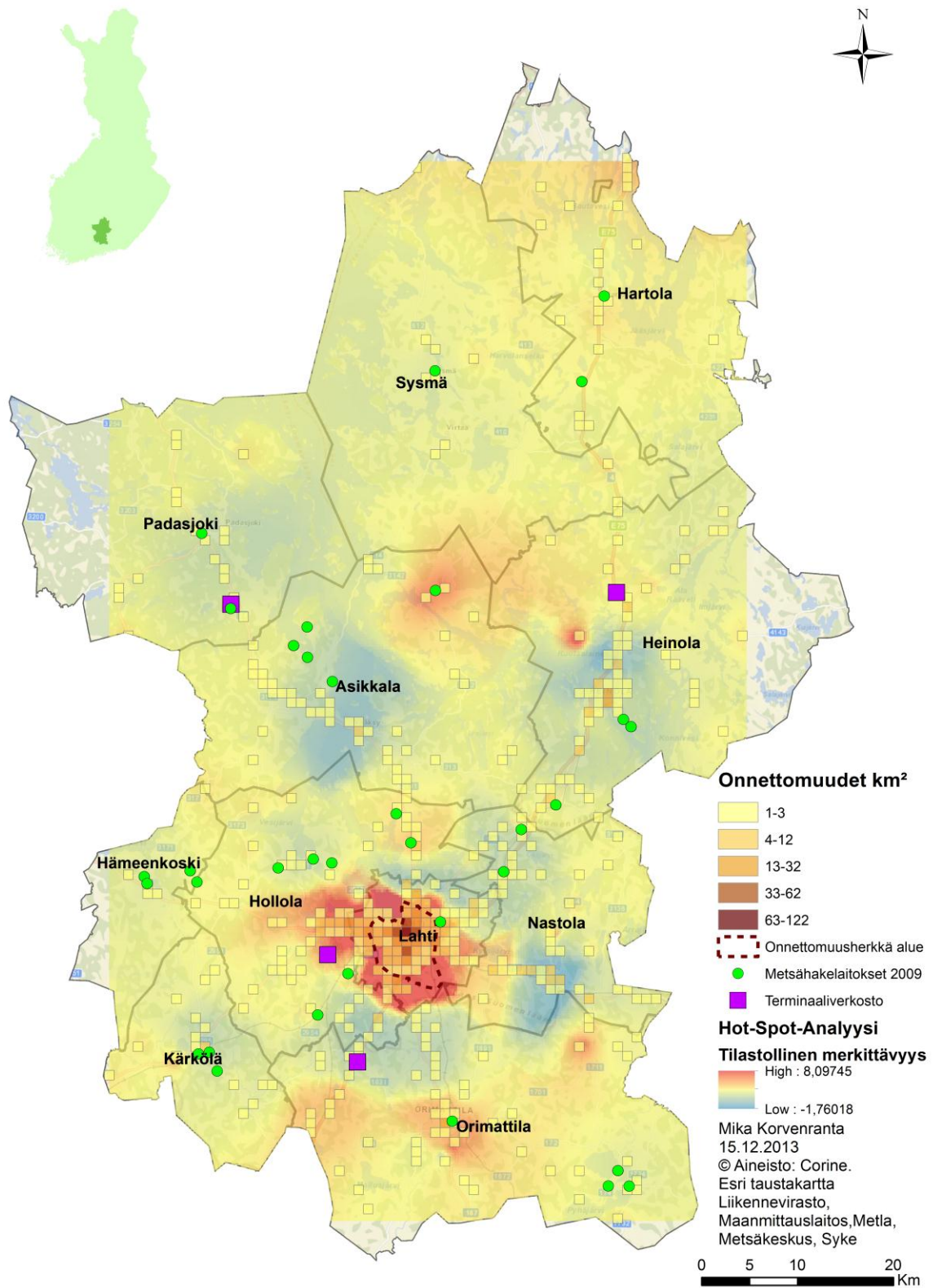
Suljettujen yhteyksien osalta aineisto eroaa hieman ajoneuvo kielletty -luokan esteistä ja kaikkien esteiden klusteroitumisesta. Ainoa tilastollisesti merkittävä kuuma alue sijaitsee Asikkalan alueella (kuva 23). Tilastollisesti merkittävä kylmiä ei ole suljettujen yhteyksien tai ajoneuvo kielletty -luokkien osalta. Tuloksien perusteella voidaan havaita, että todennäköisin taloudellinen haitta metsähakekuljetuksille sijaitsee Lahden alueella. Myös Heinolassa ja Asikkalassa on todennäköistä, että metsähakekuljetuksen esteistä koituu taloudellista haittaa.



**Kuva 23.** Hakekuljetusta rajoittavia esteitä Päijät-Hämeessä, ajoneuvo kielletty ja suljetun yhteyden osalta. Lisäksi on tehty *Hot Spot* -analyysi esteiden sijoittumisesta Päijät-Hämeessä. High ja low arvot ovat testin tuloksia. Tummanpunaisella alueella olevat esteet ovat tilastollisesti merkitsevästi klusteroituneita eli esteet ovat siellä lähempänä toisiaan (raja-arvona +2,58).

### 8.3 Liikenneonnettomuudet Päijät-Hämeessä

Liikenneonnettomuudet sijoittuvat Päijät-Hämeessä karttatarkastelun perusteella isojen teiden varsille sekä kuntien keskustoihin. Tämä oli ennalta arvattava tulos, sillä näissä paikoissa on paljon liikennettä. Tilastollisesti merkitseviä liikenneonnettomuusalttiita alueita Päijät-Hämeessä on analysoitavassa aineistossa vain Lahden alueella (ks. kuva 24). Tarkastelu on vain spatiaalista, jolloin voidaan määrittää alueellinen onnettomuusherkkyyttä. On otettava kuitenkin huomioon, että tällä menetelmällä ei voi arvioida suoraan liikenneonnettomuuden todennäköisyyttä, koska liikennemäärien suhteellisia osuuksia tieosuuksilla ei ole huomioitu analysissää.



**Kuva 24.** Onnettomuudet Päijät-Hämeen tieverkolla vuonna 2012. Lisäksi on tehty *Hot Spot* -analyysi onnettomuuksien sijoittumisesta Päijät-Hämeessä. Punaisella alueella olevat onnettomuudet ovat klusteroituneita eli esteet ovat siellä lähempänä toisiaan. High ja low arvot ovat testin tuloksia. Arvon on oltava vähintään +2,58 ollakseen tilastollisesti merkitsevä. Tätä kuvaa kartalla oleva onnettomuusherkkä alue.

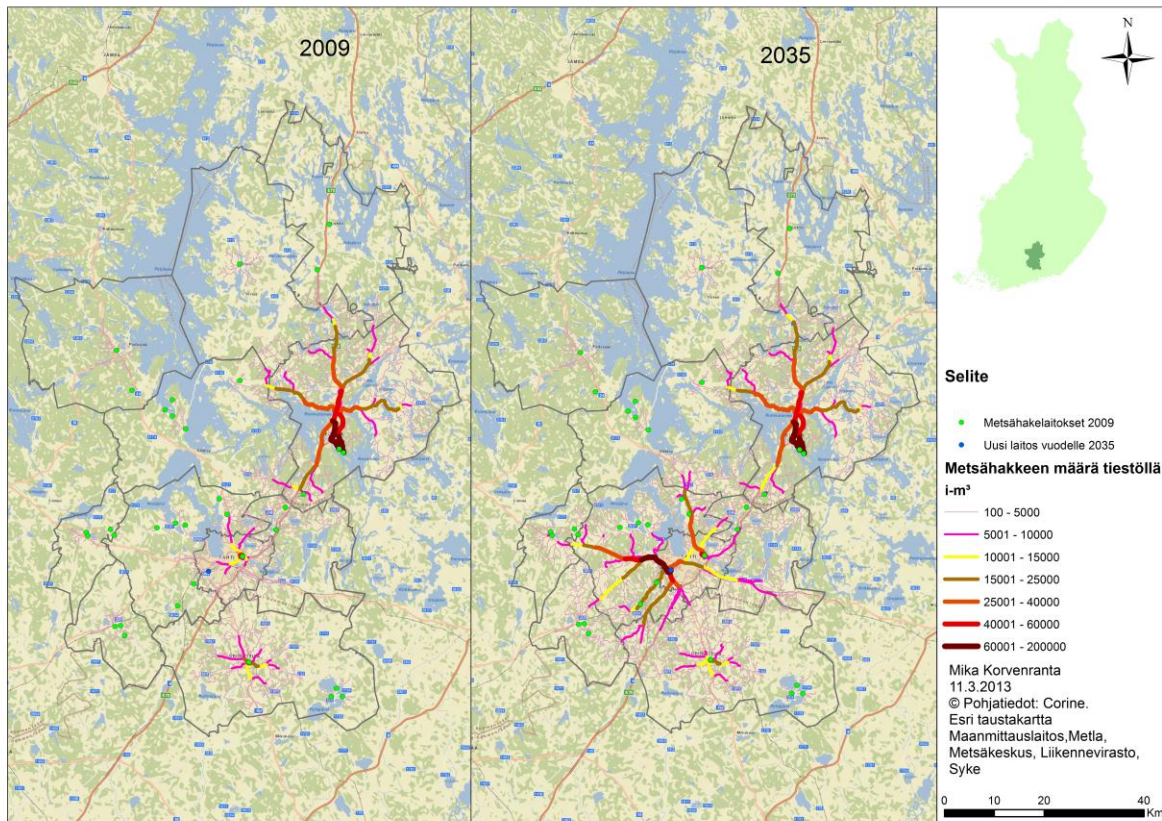


#### **8.4 Kestävyytvaikutukset logistiikkamallilla ja *Hot Spot* -analyysillä arvioituna**

Logistiikkamallilla saadut tulokset on siirretty materiaalivirtaviivoista tieverkolle, jolloin on mahdollista arvioida hakekuljetusten kuormittavuutta alueellisesti (ks. kuvat 25 ja 26). Reitit kulkevat optimaalisimpia reittejä ottaen huomioon metsähakekuljetuksen rajoitukset. Selvityksessä on siirretty kaikki neljä tuotantomallia tiestölle, jotta kuljetusten kuormittavuutta tieverkkoon on mahdollista vertailla alueellisesti eri tuotantoketjujen osalta.

Tieverkolle aiheutetun kuormituksen avulla voidaan arvioida taloudellista kestävyttä tiestönhoidollisesta näkökulmasta. Mitä enemmän kuljetetaan tietyillä tieosuuksilla, sitä enemmän tiestö vaatii kunnossapitotoimenpiteitä. Tiestölle aiheutetun kuormituksen mallintamisella voidaan arvioida ekologisen kestävyden osa-alueita hiilidioksidipäästöjen alueellisen sijoittumisen näkökulmasta. On mahdollista arvioida myös ekologisen kestävyden kannalta kuljetusten kuormittamien tieosuuksien sijoittumista ekologisesti herkkien alueiden kanssa.

Liikenneonnettomuuksien ja metsähakekuljetusesteiden sijoittumista Päijät-Hämeen alueella on tarkasteltu osana kestävytvaikutusten arviointia. Tietämällä liikenneonnettomuuksien sijoittuminen ja käytetyimmät tiet metsähakkeen tuotannossa, voidaan arvioida liikenneturvallisuutta ja viimekädessä sosiaalista kestävyttä metsähakkeen tuotannossa. Metsähakkeen kaukokuljetuksien sijoituessa tieosuuksille, jossa tapahtuu paljon onnettomuuksia, on suurempi riski liikenneonnettomuuteen metsähakekuljetuksien osalta. Metsähakekuljetusten esteiden ja metsähakkeen tuotannossa käytetyimpien teiden avulla voidaan tarkastella logistisen haitan sijoittumista optimaalisimpiin kuljetusreitteihin nähden. Tätä kautta pystytään analysoimaan metsähakekuljetusten vaikutusta myös taloudelliseen kestävytyteen.

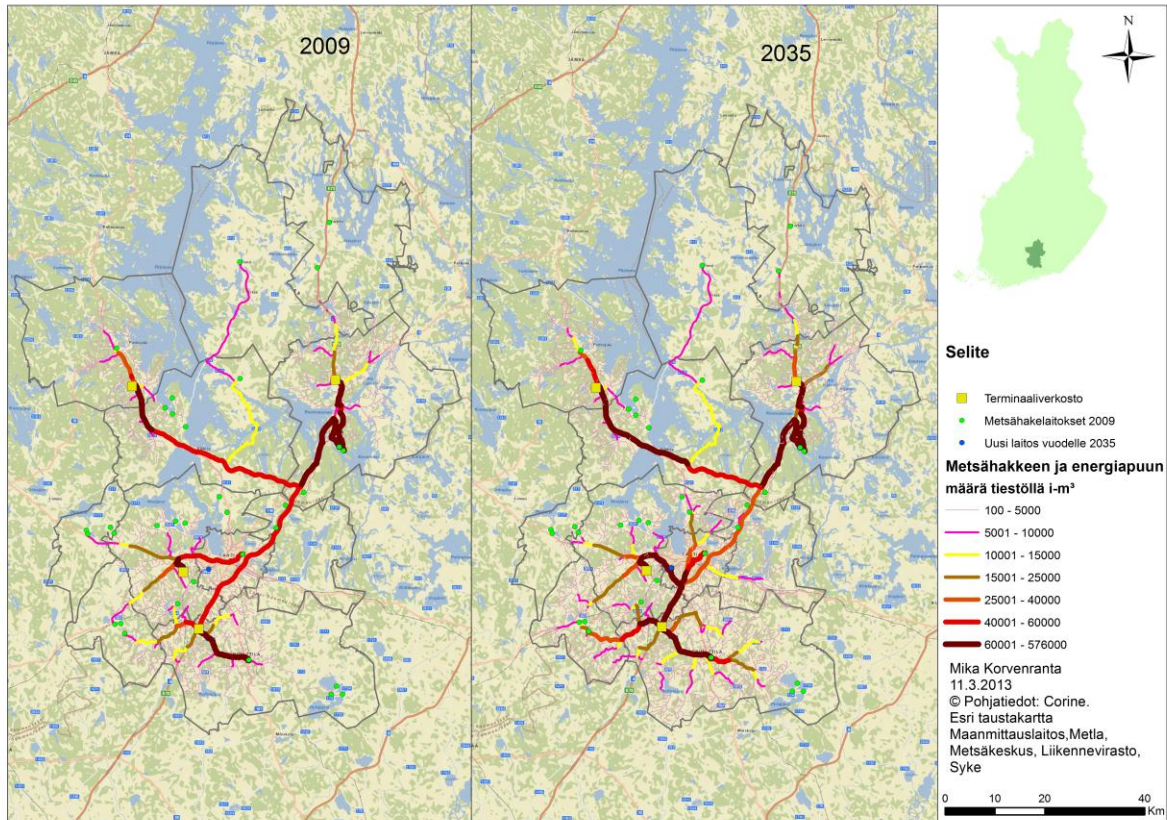


**Kuva 25.** Metsähakkeen määrä tiestöllä vuonna 2009 ja 2035 tievarsihaketuksen tuotantoketjulla.

Tuotantoketjujen kestävyysvaikutuksia voidaan analysoida vertailemalla tienvarsihaketuksen ja terminaalihaketuksen tuotantoketjujen aiheuttamaa tiestön kuormittavuutta. Tienvarsihaketuksen tuotantoketjussa tiestölle aiheutettu kuormittavuus kasvaa erityisesti Lahden alueella, jossa on mallissa uusi metsähakkeen käyttökohde. Tämä myös ohjaa toisaalta kuljetusta hieman keskustan ulkopuolelle, koska paljon kuljetusta suuntautuu uudelle käyttökohteelle eli Lahden Hennalan alueelle (ks. kuva 25). Toisaalta kuljetus jo olemassa oleville laitoksille suuntautuu enemmän pohjois- ja itäsuunnasta.

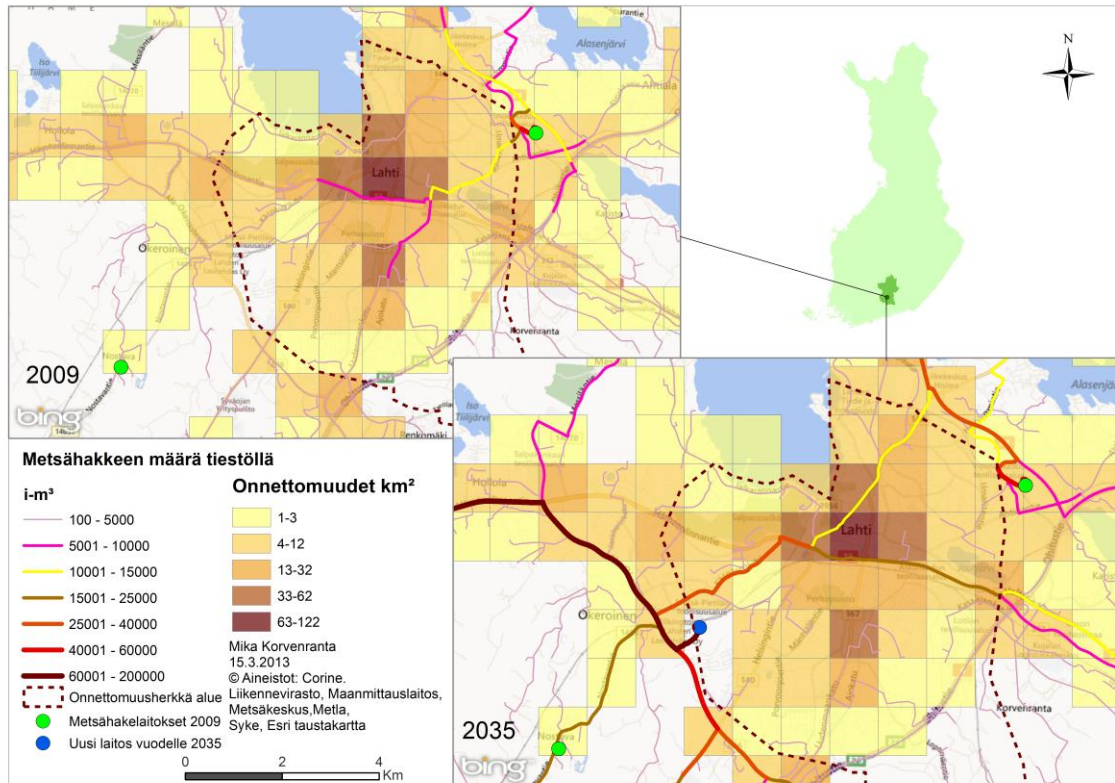
Terminaalihaketuksen tuotantoketjun voidaan havaita kuormittavan huomattavasti enemmän tiestöä kuin tienvarsihaketuksen kuten kuvasta 26 näkyy. Tämä johtuu kuljetuksen suuntautumisesta ensin terminaalin, jonka jälkeen materiaalia kuljetetaan käyttökohteelle. Erityisesti terminaalien läheisyydessä kuljetettavan raaka-aineen suurempi määrä terminaalihaketuksen tuotantoketjussa on selvästi havaittavissa. Toisaalta kuormitusta on vähemmän Päijät-Hämeen pohjoisosissa ja kuormitus suuntautuu hieman enemmän isommille teille. Erityisesti Viljaniemen liittymän terminaalin alueella on havaittavissa selvä ero tienvarsihaketuksen ja terminaalihaketuksen välillä (ks. kuva 30). Toisaalta Lusin

terminaalissa Heinolassa terminaalihaketuksen ja tienvarsihaketuksen välillä ei ole suurtakaan eroa tiestönkuormittavuuden osalla (ks. kuva 29). Tämä selittyy pitkälti sillä, että tieosuuksilla kulkee muutenkin melko paljon tienvarsihaketuksen metsähakekuljetuksia. Kuvasta 29 voidaan havaita, että Heinolan alueella kuljetetaan paljon hakekuljetusesteille herkällä alueella. Suurin osa kuljetuksista tehdään kuitenkin päätteitä pitkin, jolloin kuljetusesteistä ei koidu taloudellista haittaa.

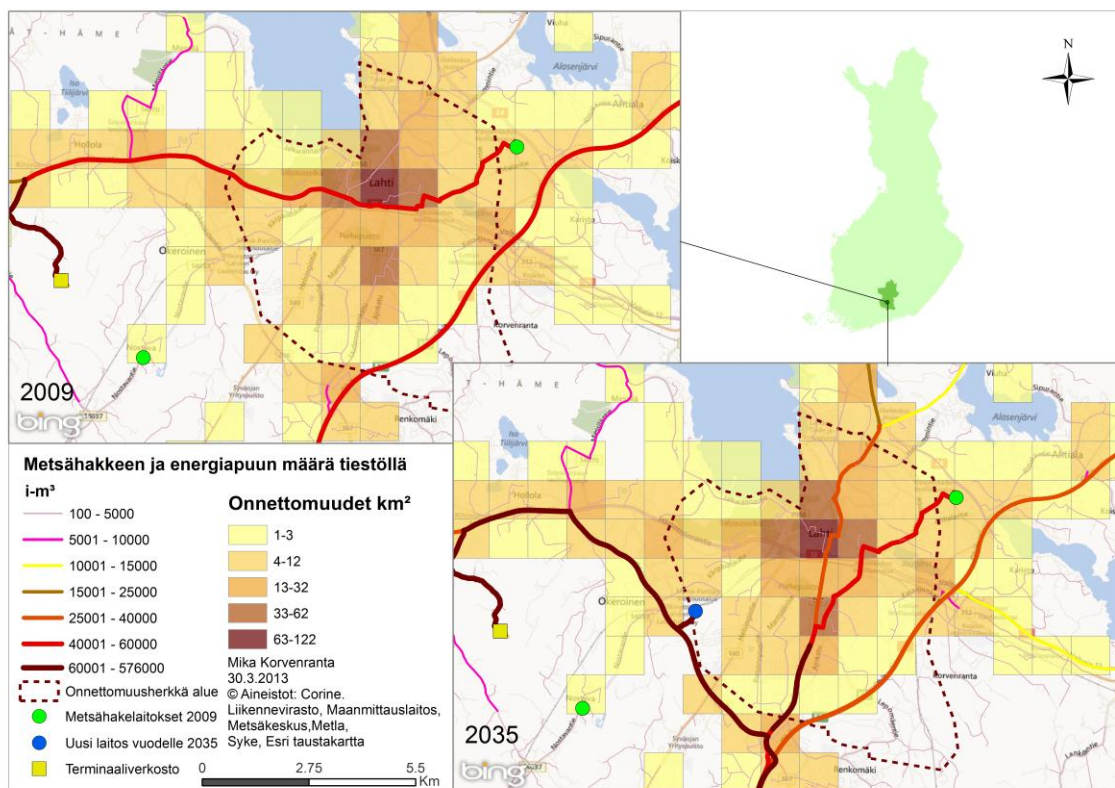


**Kuva 26.** Metsähakkeen ja energiapuun määrä tiestöllä vuonna 2009 ja 2035 terminaalihaketuksen tuotantoketjulla.

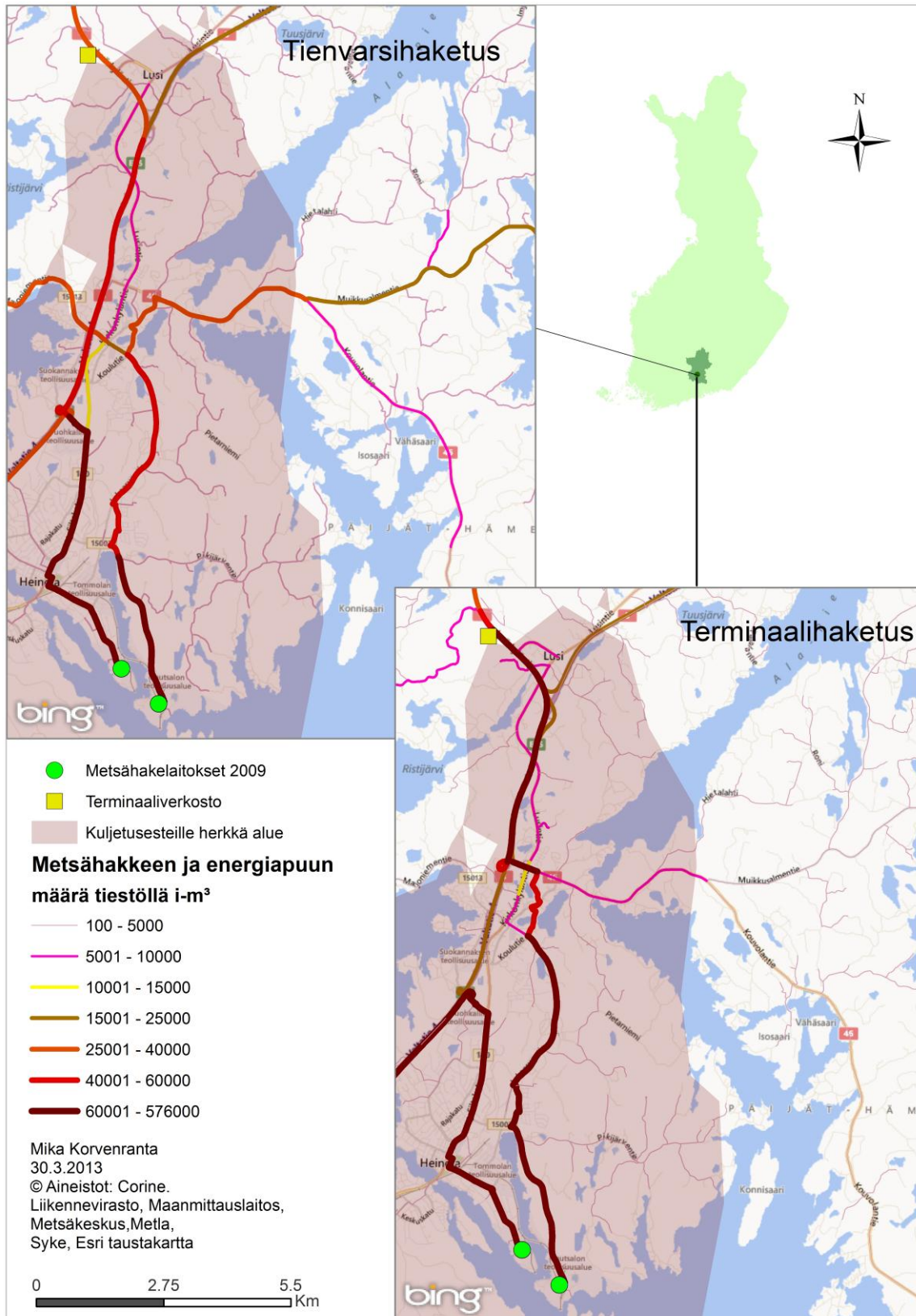
Liikenneonnettomuusaineistolla voidaan arvioida metsähakkeen tuotannon sosiaalista kestävyyttä kun vertaillaan samassa kartassa myös metsähakkeen tuotannon tiestökuormitustuloksia kuten kuvassa 27 ja 28. Tarkastelussa on käytetty vain Lahden aluetta, koska tämä oli ainoa tilastollisesti merkitsevä onnettomuusherkillä alue. Kuvan 27 ja 28 perusteella voidaan todeta, että terminaalihaketuksen tuotantoketju lisää enemmän kuljetusta onnettomuusherkillä alueilla.



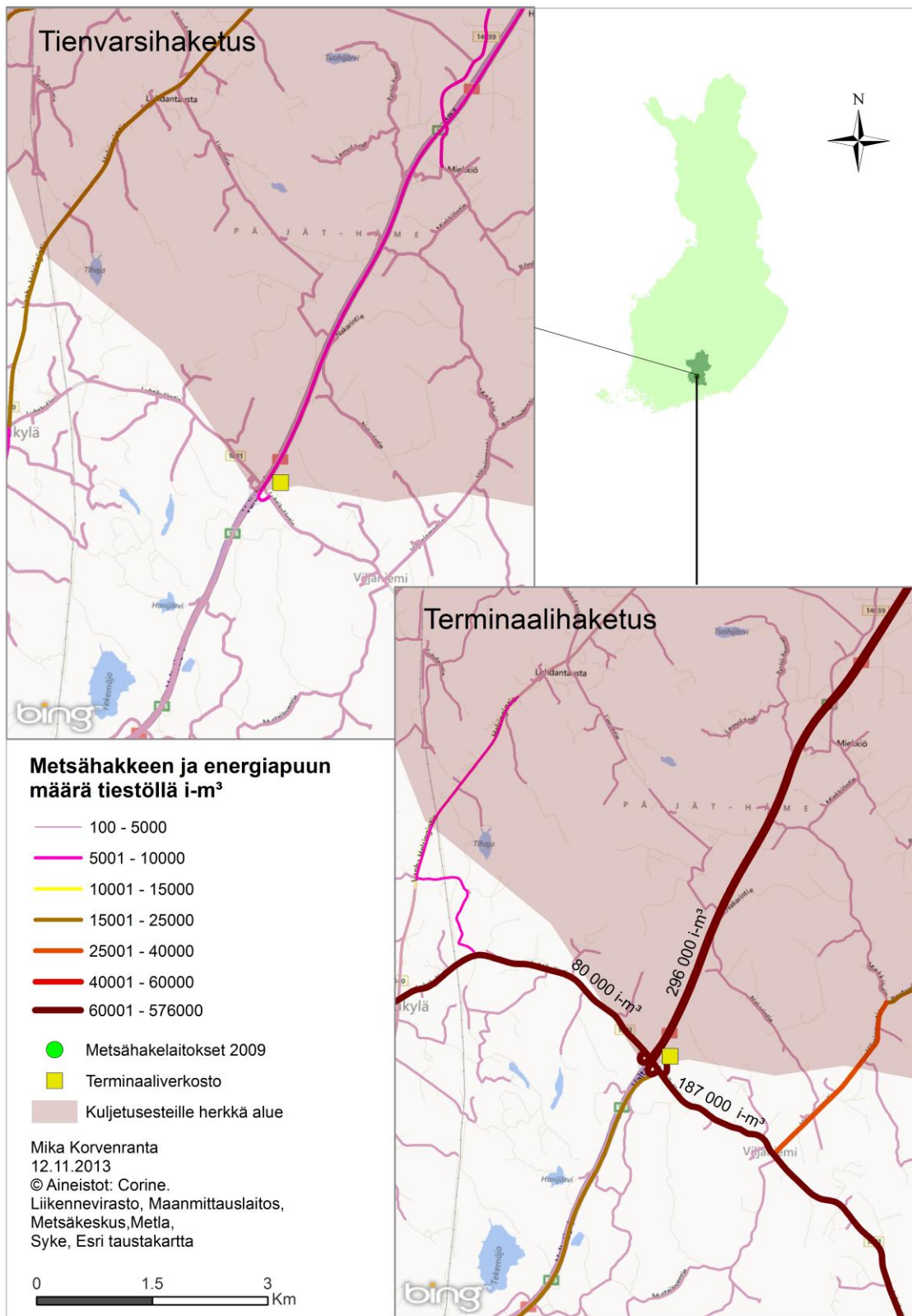
**Kuva 27.** Metsähakkeen tuotannon lisäämisen vaikutus logistiikan kestävyyyden tienvarsihaketuksen tuotantoketjussa. Kuormitus kasvaa erityisesti uuden laitoksen lähetytyillä.



**Kuva 28.** Metsähakkeen tuotannon lisäämisen vaikutukset logistiikan kestävyyyden terminaalihaketuksen tuotantoketjussa. Tiestön kuormittavuus kasvaa erityisesti uuden laitoksen lähetytyillä, mutta myös onnettomuusherkällä alueella Etelä-Lahdessa.



**Kuva 29.** Tienvarsi- ja terminaalihaketuksen logistiikan kestävyysvaikutukset Heinolassa. Alue sijaitsee kuljetusesteille herkällä alueella, mikä saattaa nostaa tuotannon kustannuksia. Tienvarsi- ja terminaalihaketuksen välillä ei ole suurta eroa tiestön kuormittavuuteen.

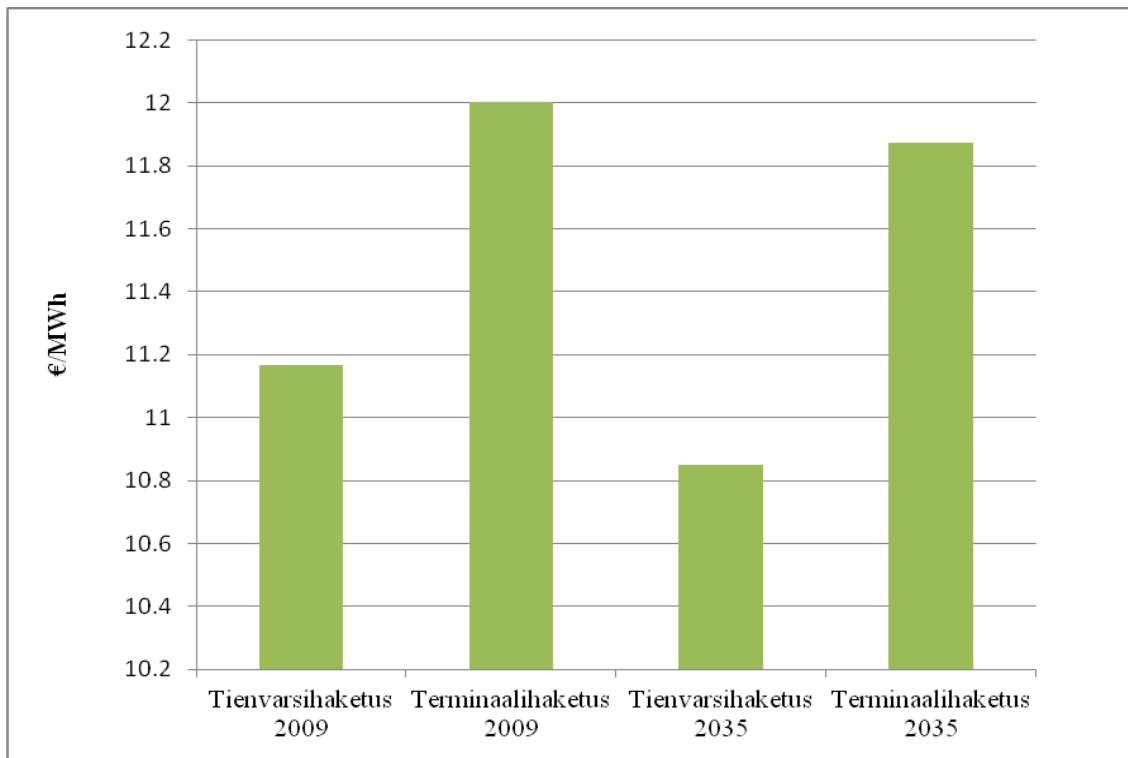


**Kuva 30.** Terminaalihaketuksen ja tienvarsihaketuksen erot tiestön kuormittavuuteen terminaaliläheisyydessä vuoden 2035 skenaarioissa. Terminaalihaketuksen tuotantoketju kuormittaa tiestöä eniten terminaaliläheisyydessä, mikä korostuu verrattaessa samaa aluetta tienvarsihaketuksen tuotantoketjussa.

## 8.5 Tuotantokustannukset ToSIA-työkalulla arvioituna

Terminaalihaketuksen tuotantoketju vuoden 2009 tuotantomallilla on tuotantokustannuksiltaan kallein ketju 12 euron kustannuksella megawattituntia kohden (kuva 31). Eroa tienvarsihaketuksen tuotantoketjuun vuonna 2009 on noin 80 senttiä. Tämä selittyy sillä, että terminaalihaketuksen ketjussa on yksi prosessi enemmän lisäämässä kustannuksia. Molemmissa ketjuissa vuoden 2035 skenaariot olivat edullisempia kuin vuonna 2009. Tienvarsihaketuksen ketju halpeni kuitenkin selvästi enemmän. Tämä selittyy haketuksen kustannuseroilla eri puulajien välillä. Vuoden 2035 skenaariossa kantojen ja hakkuutähteiden osuus on huomattavasti suurempi kuin vuonna 2009. Ihalaisen & Asikaisen (2010) mukaan kantojen hakettaminen käyttökohteella on halvempaa kuin terminaalissa. Tämä selittää miksi tuotantokustannukset eivät laskeneet terminaalihaketuksessa niin paljoa kuin tienvarsihaketuksessa. Tuotantokustannuslaskelmissa ei ole otettu huomioon mahdollista kustannusten nousua esimerkiksi polttoaineen osalta, mikä vääristää hieman todellista tuotantokustannusten muuttumista vuoden 2035 skenaariossa.

Kaukokuljetuksen osuus tuotantokustannuksissa näyttää jäävän melko pieneksi. Vaikka tienvarsihaketuksen ketjussa kaukokuljetusmatka hieman kasvaa, kokonaistuotantokustannukset laskevat huomattavasti haketuksen kustannuseroista johtuen. Terminaalihaketuksen tuotantoketjussa kokonaiskaukokuljetusmatka pienenee, kun otetaan huomioon ensin kuljetus metsästä terminaaliin ja sen jälkeen kuljetus terminaalista käyttökohteelle. Matka metsästä terminaaliin kuitenkin hieman kasvaa. Tämä näyttää kallistavan kaukokuljetusten kokonaiskustannuksia, koska kustannukset ovat suurempia kuljetettaessa energiapuuna kuin hakkeena. Kaikkien prosessien indikaattoriarvot ovat liitteessä 5, josta voi nähdä eri prosessien ominaisvaikutukset kustannuksiin. Liitteessä 7 on listattuna prosessikohtaiset tuotantokustannukset, työllisyysvaikutukset ja kasvihuonekaasupäästöt.

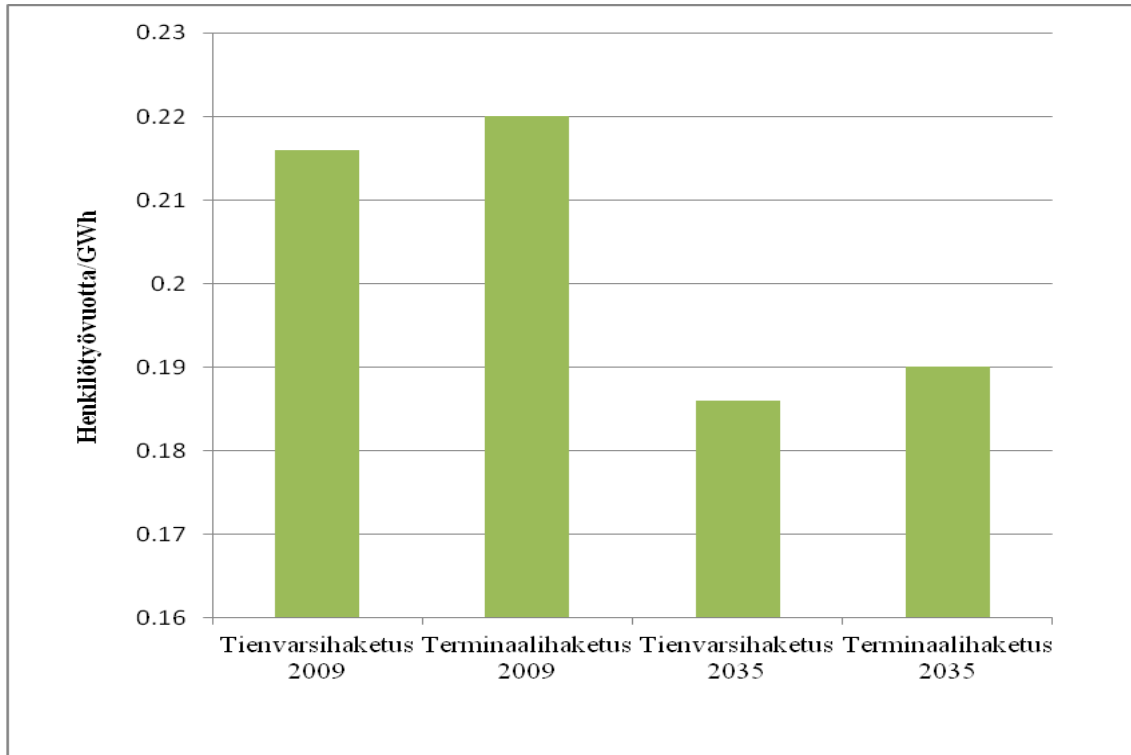


**Kuva 31.** Terminaalihaketuksen ja tienvarsihaketuksen tuotantokustannukset vuosina 2009 ja 2035 ToSIA-työkalulla laskettuna. Tuotantokustannuksissa ei ole otettu huomioon mahdollista tuotantokustannusten nousua vuoteen 2035 esimerkiksi polttoaineen osalta.

### 8.6 Työllisyysvaikutukset ToSIA-työkalulla arvioituna

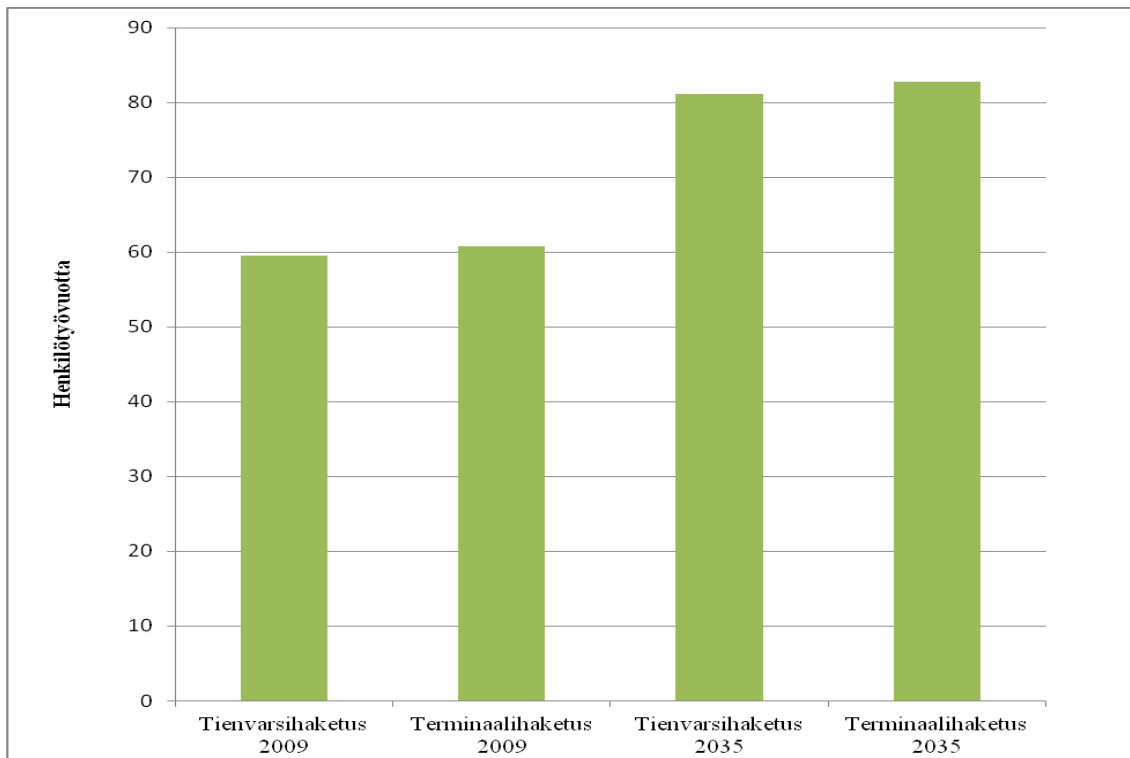
Terminaalihaketuksen tuotantoketju työllistää tulosten perusteella tienvarsihaketusta enemmän. Tienvarsihaketusta työllistää 0,216 henkilötyövuotta gigawattituntia kohden ja terminaalihaketusta 0,22 henkilötyövuotta gigawattituntia kohden (kuva 32). Ero on samanlainen myös vuoden 2035 skenaarioissa. Ero selittyy tienvarsihaketuksen pienemmällä työvoimatarpeella, koska prosesseja on yksi vähemmän. Toisaalta tienvarsihaketusta työllistää enemmän haketuksen prosessissa mutta kaukokuljetuksien osalta terminaalihaketuksen ketju työllistää enemmän. Tämä selittää terminaalihaketuksen tuotantoketjun suuremman kokonaisyöllistyvyyden. Terminaalihaketuksessa on käytetty samoja arvoja työllisyydelle kuin käyttökohteella tapahtuvassa kantojen haketuksessa, koska parempia arvoja työllisyysvaikutuksista ei löytynyt. Tämä saattaa vaikuttaa tuloksiin hieman terminaalihaketuksen tuotantoketjujen työllisyysvaikutusta pienentävänä tekijänä.





**Kuva 32.** Terminaalihaketuksen ja tienvarsihaketuksen tuotantoketjun työllisyysvaikutukset gigawattituntia kohti.

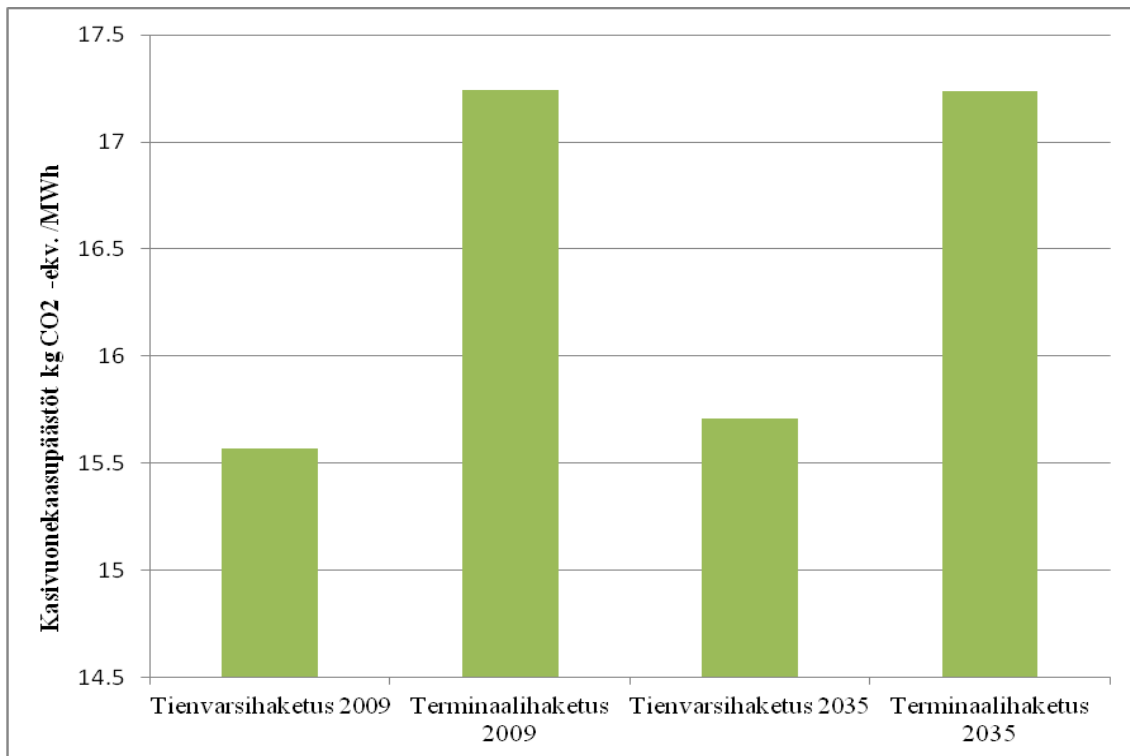
Työllisyysvaikutusten vähenemistä vuoden 2035 skenaarioissa selittää tienvarsihaketuksen osalta energiapuulajien prosentuaalisten osuuksien muutokset. Erityisesti pienpuun tuotannon prosentuaalinen vähentyminen vuoden 2035 skenaarioissa vähentää työllistävyyttä gigawattituntia kohden. Kokonaistyöllistävyyden osalta tulokset ovat lähes samanlaisia tienvarsihaketuksessa ja terminaalihaketuksessa. Vuoden 2009 tuotantomallissa molemmat ketjut työllistävät noin 60 henkilötyövuotta ja vuoden 2035 skenaariossa noin 80 henkilötyövuotta (kuva 33). Vertaamalla henkilötyövuosien kehitystä tuotettuun energiamäärään, voidaan nähdä tuottavuuden muuttumista vuosien 2009 ja 2035 välillä. Tuottavuus paranee vuoden 2035 skenaarioissa vuoden 2009 tasoista huomattavasti eli yhdellä henkilötyövuodella saadaan tuotettua enemmän energiaa. Pienpuun suurempi suhteellinen osuus vuoden 2009 tuotantomalleissa nostaa työllistävyyttä. Tästä voidaan päätellä, että hakkuutähteen ja kantojen tuotantoketju on pienpuuta tuottavampaa.



**Kuva 33.** Terminaalihaketuksen ja tienvarsihaketuksen tuotantoketjujen absoluuttiset työllisyysvaikutukset Päijät-Hämeessä.

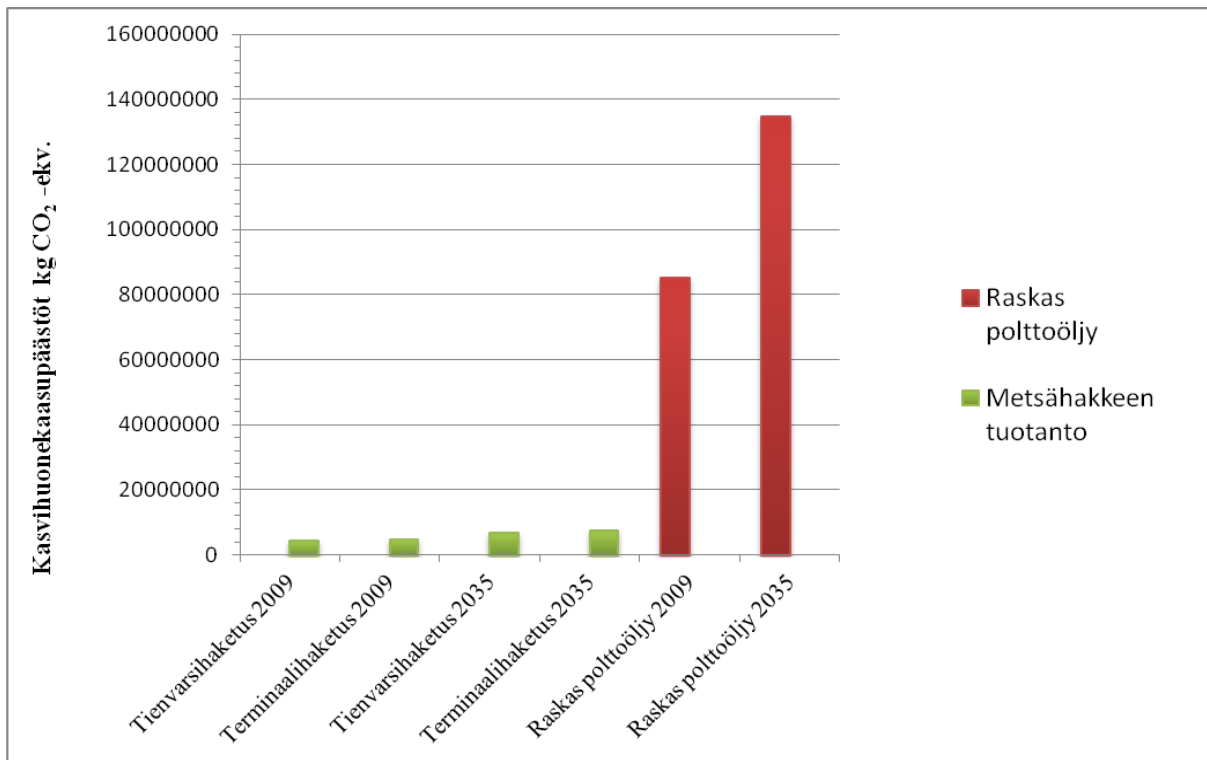
### 8.7 Kasvihuonekaasupäästöt ToSIA-työkalulla arvioituna

Kasvihuonekaasupäästöihin on sisällytetty koneiden käytöstä aiheutuvat päästöt sekä käyttökohteella poltosta aiheutuvat päästöt. Laskelmissa on oletettu, että metsähakkeen tuotanto on hiilineutraalia, koska metsähakkeen poltossa vapautuva hiili sitoutuu uudelleen kasvavaan puustoon. Tämä laskee kokonaispäästöjä huomattavasti. Päästöt jäävät melko alhaisiksi myös käyttökohteen prosessin osalta. Tästä huolimatta polttamisesta aiheutuu lähes puolet metsähakkeen tuotannon kasvihuonekaasupäästöistä (ks. liite 7). Tienvarsihaketuksen tuotantoketjusta aiheutuu noin 15,5 kg CO<sub>2</sub> –ekv. päästöt megawattituntia kohden kun terminaalihaketuksen tuotantoketjusta aiheutuu noin 17,25 kg CO<sub>2</sub> –ekv. päästöt (kuva 34). Vuoden 2035 skenaarioissa lukemat ovat lähes yhteneviä vuoden 2009 tuotantomallille terminaalihaketuksen osalta kun tienvarsihaketuksen tuotantomallilla kasvihuonekaasupäästöissä on pientä kasvua. Tämä selittyy energiapuulajien prosentuaalisen osuuden muuttumisella, sillä kantojen osuus nousee ja kantojen hakettaminen käyttökohteella aiheuttaa enemmän kasvihuonekaasupäästöjä. Terminaalihaketuksen tuotantomalliin vaikutus ei ole suurta, koska haketus tapahtuu aina terminaalissa.



**Kuva 34.** Terminaalihaketuksen ja tienvarsihaketuksen tuotantoketjuista johtuvan kasviuonekaasupäästöjen vertailua.

Tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotantoketjujen erot kasviuonekaasupäästöissä ovat melko pieniä kun verrataan tuotantoa raskaan polttoöljyn tuotantoon, josta aiheutuu noin 310 kg CO<sub>2</sub>-ekv. kasviuonekaasupäästöjä megawattituntia kohden (Den Herder ym. 2012). Kuvassa 35 ilmenee raskaan polttoöljyn tuotannosta aiheutuvat kasviuonekaasupäästöt jos sitä käytettäisiin yhtä paljon energian tuotannossa kuin haketta vuosien 2009 ja 2035 tuotantomalleissa. Metsähakkeen tuotannon kasviuonekaasupäästöt ovat noin 4,3 miljoonaa kg CO<sub>2</sub>-ekv. tienvarsihaketuksessa vuonna 2009 ja noin 4,7 miljoonaa kg CO<sub>2</sub> -ekv. terminaalihaketuksessa (kuva 35). Erot metsähakkeen tuotantoketjujen välillä ovat kuitenkin melko pieniä verrattaessa tuotannon päästöjä esimerkiksi raskaan polttoöljyn energiantuotantomuotoon. Raskaalla polttoöljyllä energiantuotannon kasviuonekaasupäästöt ovat vuoden 2009 energiantuotantotasolla noin 85 miljoonaa kg CO<sub>2</sub> -ekv., joten raskaan polttoöljyn kasviuonekaasupäästöt ovat lähes 19 kertaa suuremmat metsähakkeen tuotannon päästöihin verrattuna. Metsähakkeen poltossa hiili sitoutuu uudelleen kasvavaan puustoon, mutta raskaan polttoöljyn energiantuotannossa ei. Tämä selittää kasviuonekaasupäästöjen eroa keskeisellä tavalla.



**Kuva 35.** Terminaali- ja tienvarsihaketuksen tuotantoketjuista johtuvan kasvihuonekaasupäästöjen vertailua raskaan polttoöljyn tuotannon kasvihuonepäästöihin samalla energiantuotantomäärällä vuonna 2009 ja 2035.

## 9 Pohdinta

### 9.1 Metsähakkeen tuotannon lisäämisen kestävyysvaikutukset Päijät-Hämeessä

Nykyhetken kestävyysvaikutukset on tiedettävä ennen kuin voidaan arvioida tulevaisuuden tilannetta. ToSIA-työkalulla tehtyjen laskentojen perusteella tienvarsihaketuksen tuotantoketju on hieman kannattavampi tuotantotapa taloudellisen kestävyuden näkökulmasta. Myös logistiikkamallilla arvioituna tienvarsihaketusta on taloudellisesti kestävämpi vaihtoehto, koska tuotannossa aiheutuu vähemmän kuljetusta. Terminaalihaketuksen tuotantoketjun edut tulevat esiin vasta terminaalissa esimerkiksi tuotantovarmuuden parantumisena, eli ne jäävät logistiikkamallin ja ToSIA-työkalun tarkastelun ulkopuolelle.

Tuotantoketjujen ekologista kestävyyttä vertailtaessa tienvarsihaketuksessa aiheutuu vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä kuin terminaalihaketuksessa tuotantoketjusta. Toisaalta terminaalihaketuksessa ympäristöhäiriöt ovat paremmin hallittavissa tuotannon keskittyessä suurempiin yksiköihin. Sosiaalisen kestävyuden osalta terminaalihaketuksen tuotantoketjussa on sen sijaan hieman parempi työllisyysvaikutus. Työllisyysvaikutukset jakaantuvat myös terminaalihaketuksen tuotantoketjussa tasaisemmin koko vuoden osalla, koska terminaalilla voidaan hakettaa ja toimittaa haketta tasaisemmin ympäri vuoden.

On vaikea arvioida kumpi tuotantoketjuista on kestävämpi, koska tulos riippuu siitä, mitä kestävyysvaikutusta analyyseissä halutaan painottaa. ToSIA-työkalun tulosten perusteella tienvarsihaketuksen tuotantoketju on tällä hetkellä kestävämpi taloudellisella ja ekologisella indikaattorilla mitattuna. Logistiikkamallilla ja *Hot Spot* -analyysillä tarkasteltuna tienvarsihaketuksen tuotantoketjua voidaan pitää kestävämpänä vaihtoehtona materiaalivirran spatiaalisen jakautumisen perusteella. Asiantuntiahaastatteluiden perusteella erityisesti työllisyysvaikutukset ja tuotantovarmuus nousivat tärkeinä näkökulmina metsähakkeen tuotannon kestävyttä arvioidessa, minkä perusteella terminaalihaketusta voidaan pitää näin tarkastellen kestävämpänä vaihtoehtona.

Metsäenergiaa pidetään lähtökohtaisesti kestäväenä energiantuotantomallina, mutta miten tilanne muuttuu tulevaisuudessa? Tutkielman ensimmäisessä tutkimuskysymyksessä

pohdin, miten metsähakkeen tuotannon lisääminen vaikuttaa logistiikan kestävyYTEEN. Ennen kaikkea keskitetyssä metsäenergian alueellisessa tuotannossa raaka-aineen kuljetusmatkat pitenevät väistämättä, koska materiaalia joudutaan hakemaan yhä kauempaa suuriin käyttökohteisiin niin Päijät-Hämeessä kuin maakunnan ulkopuolella. Kun metsähakkeen käytön oletetaan kasvavan myös Päijät-Hämeen viereisissä maakunnissa, kilpailu raaka-aineesta kiristyy ja kuljetusmatkat saattavat kasvaa tämän seurauksena. Toisaalta metsähakkeen kasvava käyttö saattaa nostaa metsähakkeen hintaa ja toiminnan kannattavuutta varsinkin, jos raaka-ainetta on vähän saatavissa.

Tuotantoketjujen ja energiapuulajien suhteellinen osuus tuotannosta vaikuttaa merkittävästi kestävyysvaikutusten muutoksiin metsähakkeen kokonaistuotannossa. Terminaalihaketuksen tuotantoketjun osuuden uskotaan kasvavan jopa yli puoleen hakkeen kokonaistuotannosta, mikä lisää erityisesti paikallista työllisyyttä. Vuoden 2035 tuotantomalleissa hakkuutähteen osuus oli suurempi kuin vuoden 2009 tuotantomalleissa. Tämä vaikuttaa oleellisesti tuotannon kestävyysvaikutuksiin, esimerkiksi kustannusten halpenemisen myötä tuotannon taloudellinen kestävyys paranee.

Logistiikkaoptimointi nousi esille tärkeänä tekijänä tulevaisuuden kestävyysvaikutuksien hallinnassa. ToSIA-työkalulla saatujen tulosten mukaan tuotantokustannukset ja kasvihuonekaasupäästöt eivät nouse merkittävästi vuoden 2035 skenaariossa, kun käytetään optimaalista materiaalivirtaa kuljetuksissa. Todellisuudessa metsäenergiakuljetuksia menee huomattavasti ristiin ja siten pois optimaalisilta reiteiltä, koska toimijoiden toimitussopimukset määräävät energiapuuerän kohteen. Se vaikuttaa negatiivisesti ekologiseen ja taloudelliseen kestävyYTEEN. Ratkaisuna voisi olla yritysten välinen energiapuuerien vaihtokauppa, jolloin saataisiin ohjattua hakekuljetuksia lähemmälle laitokselle. Tämä parantaisi yritysten kannattavuutta ja vähentäisi kasvihuonekaasupäästöjä. Logistiikkaoptimointi tulee olemaan yhä tärkeämpää tulevaisuudessa, kasvavan kysynnän ja raaka-aineen heikomman saatavuuden johdosta.

Logistiikan kestävyysvaikutuksiin vaikuttaa myös poliittiset linjaukset metsähakkeen tuotannon kehittämisestä. Lokakuun alussa vuonna 2013 Suomeen tuli voimaan uusi asetus raskaan liikenteen mitoista ja massoista. Asetuksen myötä ajoneuvon suurin sallittu korkeus nousi 4,2 metristä 4,4 metriin ja enimmäispaino 60 tonnista 76 tonniin (Valtioneuvoston

asetus ajoneuvon käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta 407/2013). Uudistuksen myötä oletetaan, että metsähakkeen tuotannosta johtuvaa tiestön kuormitusta sekä hiilidioksidipäästöjä voidaan vähentää isompien kuljetusyksikköjen avulla. Korpilahden & Koskisen (2012) mukaan nykyistä isommilla kuljetusyksiköillä on mahdollista kuljettaa puuta jopa lähes 32 prosenttia enemmän vuoden aikana. Myös suhteelliset hiilidioksidipäästöt ja tiestön kuormitus ovat pienempiä isommalla puutavarayhdistelmällä.

Liikenneviraston (2013) mukaan uudistus on tuonut uusia painorajoituksia 400 sillalle Suomessa. Painorajoitusten lisääntynyt määrä aiheuttaa nykyistä enemmän kustannuksia raskaammalla ja korkeammalla kalustolla ajaville, koska joudutaan käyttämään kiertoteitä, mikä heikentää raskaimpien rekkojen kuljetusten kannattavuutta. Uudet rajoitukset tekevät logistiikkaoptimoinnin yhä tärkeämmäksi, koska tämän avulla voidaan laskea painavamman raskaan liikenteen optimaaliset reitit. Painavampi raskas liikenne sopii erityisesti metsähaketerminaalin ja laitosten väliseen liikenteeseen, koska molemmat sijaitsevat hyvien kulkuyhteyksien varrella. Uusi asetus parantaa todennäköisesti erityisesti terminaalihaketuksen tuotantoketjun kannattavuutta.

Isompiin kuljetusyksikköihin siirtyminen ei ole kuitenkaan välttämättä sosiaalisen kestävyuden kannalta paras mahdollinen ratkaisu, vaikka se olisi taloudellisen ja ekologisen kestävyuden osalta järkevää. Erityisesti pienten kuljetusyrittäjien asema markkinoilla heikkenee, sillä he joutuvat sijoittamaan uuteen kalustoon pysyäkseen kilpailussa mukana. Tämä voi ajaa heidän asemaansa entistä heikommaksi kilpailtaessa isoja yrittäjiä vastaan. Lisäksi liikenneturvallisuus saattaa heikentyä isompien rekkalastien ollessa liikenteessä.

Maakuntakaavoitusprosessissa on otettava huomioon muuttuva energiantuotannon tila Päijät-Hämeessä. Arvioimalla eri tuotantoketjujen kestävyysvaikutuksia saadaan kehitettyä maakunnan energiantuotantoa kestävämmällä pohjalla eri näkökohdat huomioon ottaen. Metsähakkeen käyttäminen energianlähteenä tulee vähentämään hiilidioksidipäästöjä maakunnassa merkittävästi. Korvattaessa raskaan polttoöljyn käyttöä metsähakkeen tuotannolla 434.4 GWh, voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä 128 miljoonaa kg CO<sub>2</sub> – ekv. Tämä vähentäisi Päijät-Hämeen hiilidioksidipäästöjä lähes 6 prosenttia vuoden 2008 tasosta. Tarkat lukemat riippuvat tuotantoketjujen suhteellisista osuuksista tulevaisuudessa.

## 9.2. Metsähaketerminaalien vaikutukset logistiikan kestävyteen Päijät-Hämeessä

Toisessa tutkimuskysymyksessä analysoin, miten metsähaketerminaalit vaikuttavat tuotannon logistiikan kestävyteen. Tarkastelemalla metsähakkeen tuotannon materiaalivirtaa, voidaan arvioida optimaalisimpia terminaalien sijainteja, niiden kokoluokkaa ja kestävyysvaikutuksia eri skenaarioissa. Paikkatietopohjaisella logistiikkamallilla voidaan arvioida eri skenaarioiden avulla esimerkiksi metsähaketerminaalikapasiteetin riittävyttä. Skenaarioiden avulla voidaan tarkastella myös tulevaisuuden näkymiä metsähakkeen tuotannossa. Suunnittelemalla terminaalit oikeille paikoille oikeanlaisella mitoituksella kasvihuonekaasupäästöt pienenevät kuljetusmatkojen lyhenemisen takia. Terminaalien hyvällä suunnittelulla turvataan ekologisen kestävyden lisäksi myös sosiaalinen ja taloudellinen kestävyys.

Terminaalien kokoa tarkasteltaessa tuli esille, että Päijät-Hämeen eteläisimmän terminaalin kapasiteetin kasvaessa merkittävästi myös kuljetusmatkat lyhentyivät, vaikka kokonaistuotanto oli skenaariossa paljon suurempi. Tämä selittyy tuotannon keskittymisellä Päijät-Hämeen eteläosiin. Terminaalien keskittyminen tulee yhä voimakkaammin esille tulevaisuudessa, jos Lahti Energia Oy käyttää metsähaketta tulevaisuudessa suunnitellulla tavalla Lahden alueella, mikä tulee huomioida tulevaisuuden materiaalivirtojen optimoinnissa.

Terminaalien maantieteellinen sijainti muodostaa suurimmat kestävyysvaikutukset terminaalihaketuksen tuotantoketjussa joko positiivisella tai negatiivisella tavalla, minkä takia on tärkeää miettiä terminaalien mitoitusta tutkittavalla alueella. Vuonna 2011 terminaalihaketuksen tuotantoketjun osuus oli 21 prosenttia kokonaistuotannosta Suomessa (Strandström 2012). Terminaalihaketuksen tuotantoketjun arveltiin nousevan kuitenkin jopa yli puoleen kokonaistuotannosta haastatteluiden perusteelta. Tienvarsihaketusta tulee todennäköisesti olemaan osa metsähakkeen tuotantoketjua, mikä tulee muistaa terminaalialueiden mitoitusta mietittäessä. Jos terminaalihaketusta olisi puolet kokonaistuotannosta ja metsähaketta tuotettaisiin maksimaalisella tasolla Päijät-Hämeessä huomioon ottaen muiden maakuntien metsähakkeen tuotanto, terminaalihaketuksen materiaalivirrassa olisi noin 109 000–270 000 m<sup>3</sup> energiapuuta eli noin 218–540 GWh. 218 GWh kuvaa skenaariota, jossa metsähaketta tuotetaan puolet terminaalihaketuksen tuotantoketjulla ja otetaan huomioon muiden maakuntien kehitys. 540 GWh:ta kuvaa



skenaariota, jossa metsähaketta tuotetaan Päijät-Hämeessä teknis-teoreettisen potentiaalin mukainen määrä metsähaketta ja puolet terminaalihaketuksen tuotantoketjulla.

Pisto ym. (2011) ja Impola (2011) ovat tarkastelleet terminaalialueiden pinta-alaa ja näiden toimituskapasiteettia. Selvityksissä mukana olleiden viiden terminaalin keskimääräiseksi arvoiksi muodostuu noin 15,6 GWh hehtaaria kohden. Tällä oletuksella laskettuna Päijät-Hämeen metsähaketerminaalien tilantarpeeksi muodostuu 14–35 hehtaaria. Varastoinnin kiertoaika vaikuttaa olennaisesti mitoittamiseen. Mikäli terminaalien varastoinnin kiertoaika on hidas, terminaalien pinta-alan tarve kasvaa, sillä yhdelle hehtaarille mahtuu noin 7 GWh haketta tai murskaa (Impola & Tiipponen 2011).

Maakunnallista terminaaliverkostoa mitoittaessa tulee huomioida olemassa olevat terminaalialueet, joita on olemassa useita eri toimijoilla Päijät-Hämeen alueella. Tuotannon kapasiteetti muut terminaalialueet, kuljetusmatkat ja toimitusvarmuus huomioon ottaen Päijät-Hämeeseen voisi sopia noin 3–5 terminaalialueen verkosto, joka koostuisi yhdestä isommasta metsähaketerminaalista ja useammasta pienemmästä terminaalista. Isomman kokoluokan terminaalien voisi yhdistää myös muita materiaalin käsittelyä kuten maa-ainesten ja jätteiden käsittelyä.

### **9.3 Metsähakkeen tuotannosta johtuvat alueelliset ongelmakohdat Päijät-Hämeessä**

Logistiikan esteistä aiheutuu paikallisesti huomattavaa haittaa metsähakekuljetuksille, mikä nostaa tuotantokustannuksia kaukokuljetuksen osalta. Esimerkiksi Lahti, Heinola ja Asikkala nousivat esiin kuljetuksen esteistä tehdyssä *Hot Spot* -analyysissä. Logistiikan esteet vaikuttavat huomattavalla tavalla metsähakkeen tuotannon alueelliseen kuormittavuuteen, sillä esteet siirtävät kuljetusreitit muille tieosuuksille. Kolmannessa tutkimuskysymyksessä tutkin, mille alueille kohdistuu suurin kuormitus metsähakkeen tuotannon johdosta. Haastatteluissa logistisena ongelmakohtana nähtiin erityisesti Lahden alue. Lahden alue nousi esille myös tarkasteltaessa sosiaalista kestävyyttä onnettomuuksien osalta, sillä Lahti oli ainut tilastollisesti merkitsevä onnettomuusherkkä alue Päijät-Hämeessä. Ratkaisuna ongelmakohtiin voisi olla parempien kulkuyhteyksien rakentaminen Lahden seudulle, jotka toisivat parannusta liikenteen sujumuuteen myös metsähakekuljetusten osalta. Esimerkiksi Lahden ohitit parantaisi logistisia ongelmia Lahden alueella.

Metsähakkeen tuotannon logistiikan kuormittavuus tiestölle vaihtelee alueellisesti paljon, suurin kuormitus tuotannosta muodostuu terminaalien ja käyttökohteiden läheisyyteen. Tuotannon lisääntyessä myös tiestön kuormitus kasvaa erityisesti käyttökohteiden läheisyydessä. Tiestön kohdistuvaa kuormitusta voidaan kuitenkin hallita, vaikka metsähakkeen tuotanto lisääntyisi. Metsähaketerminaalien optimaalisimpien sijaintien ja oikeanlaisen kapasiteetin avulla kuljetusmatkat voivat jopa lyhentyä tuotannon lisääntyessä, mikä vähentää tiestön kuormituksen lisäksi hiilidioksidipäästöjä.

## 10 Johtopäätökset

Bioenergian tuotantoa tulee käsitellä osana kestävästä energiajärjestelmän kokonaisuutta (Antikainen ym. 2007). Metsäenergiantuotanto on yksi osa kestävästä energiantuotantoa. Pelkästään metsähakkeen tuotantoa nostamalla ei voi turvata koko Suomen energian tarvetta tulevaisuudessa, mutta kestäväntä tuotantotapaa käyttämällä tapauskohtaisesti voidaan kuitenkin vaikuttaa energiajärjestelmän kokonaisuuteen.

Metsähakkeen tuotannon lisäämisen myötä kestävyysvaikutuksissa tapahtuu väistämättä muutoksia. Tuotantoketjujen ja energiapuulajien suhteellinen osuus tuotannossa vaikuttaa merkittävästi kestävyysvaikutusten muutoksiin. On oletettavissa, että metsähakkeen tuotannon lisääminen lisää erityisesti paikallista työllisyyttä. Tuotannon kasvun myötä kuljetusmatkat tulevat väistämättä pidentymään, mikä heikentäisi taloudellista ja ekologista kestävyyttä. Tutkielmassa on kuitenkin osoitettu, että logistiikan ja materiaalivirtojen hallinnalla vaikutetaan oleellisesti tuotannon kannattavuuteen. Optimoimalla kuljetusmatkat voidaan vaikuttaa positiivisesti yritystoiminnan kannattavuuteen, ja vaikuttaa lisäksi suoraan ekologiseen kestävyysvaikutukseen vähentämällä kasvihuonekaasupäästöjä.

Metsähaketerminaalien maantieteellinen sijainti vaikuttaa keskeisellä tavalla tuotannon logistiikan kestävyysvaikutukseen. Terminaalien sijoittaminen oikealle paikalle oikealla mitoituksella vaikuttaa myönteisesti ekologiseen, taloudelliseen ja sosiaaliseen kestävyysvaikutukseen. Metsähakkeen tuotannon suurin kuormitus kohdistuu erityisesti metsähaketerminaalien ja käyttökohteiden läheisyyteen, mikä korostaa entisestään terminaalien sijainnin suunnittelun tärkeyttä.

Metsähakkeen tuotannon systeemianalyysillä on mahdollista arvioida kestävyysvaikutuksia monipuolisesti. Alasysteemeillä kuten asiantuntijahaastattelulla saadaan erityispiirteitä systeemin kokonaisuuteen. Asiantuntijahaastattelulla voidaan tuoda paikallista näkemystä tuotantoketjun tulevaisuuden näkyymiin ja ongelmiin. Paikkatietopohjaisessa materiaalivirran analysoinnilla pystytään kaivamaan tietoja alueellisista ongelmakohdista logistiikan kestävyysvaikutuksessa. Edellä mainitut menetelmät sulautuvat hyvin ToSIA-työkalulla tehtävään analysointiin, minkä pohjana ovat niin asiantuntijahaastattelut kuin paikkatietomenetelmät.

ToSIA:lla arvioinnin laajuus riippuu rakennetusta tuotantoketjusta, mutta menetelmällä pystytään arvioimaan koko tuotantoketjun kestävyysvaikutuksia tehokkaasti.

Tämän pro gradu -tutkielman eri vaiheissa on ollut omat haasteensa. Erityisen työläiksi työvaiheiksi osoittautuivat logistiikkamallin rakentaminen ja ToSIA-työkalun analyysit niin työmäärän kuin tutkimuksen luotettavuuden varmistamisen kannalta. Logistiikkamallin pitäisi olla toiminnaltaan luotettava, mutta virheiden mahdollisuus on olemassa esimerkiksi aineiston prosessointivaiheessa, vaikka suurin osa vaiheista on tehty kahdesti virheiden minimoimiseksi. ToSIA-työkalu on sen sijaan hieman herkempi virheille, sillä aineiston syöttövaiheessa on vaikeampi tarkastaa tulosten luotettavuutta. Luotettavuutta ToSIA-työkalun kanssa on pyritty luomaan analyysin tulosten tarkastamisella ja syötetyn aineiston tarkastamisella.

Menetelmä voidaan siirtää eri tutkimusalueelle Suomessa alueen kokoluokasta riippumatta, mutta siirrettäessä tulee kuitenkin kiinnittää huomiota alueellisiin erityispiirteisiin, jotta saadaan paras mahdollinen tulos kuvaamaan tutkimusalueen tilannetta. Esimerkiksi Suomen tasolle siirrettäessä menetelmässä tulisi kiinnittää asiantuntijahaastatteluiden valintaan, paikkatietomenetelmissä aineiston keräämiseen ja prosessointiin ja ToSIA-työkalulla mallintamisessa tuotantoketjun rakentamiseen, jotta tuloksesta tulisi luotettava. ToSIA-työkalulla tuotantoketjun mallintamiseen tulee kiinnittää huomiota erityisesti siirrettäessä tutkimusaluetta Suomen rajojen ulkopuolelle, jotta alueelliset erityispiirteet saadaan menetelmässä huomioitua parhaalla mahdollisella tavalla.

Aihepiiristä on mahdollista tehdä useita erilaisia jatkotutkimuksia. Terminaalien optimaalista sijainteja ja kokoa voidaan tarkastella vielä tarkemmin eri tuotantoskenaarioiden avulla ja sitä kautta on mahdollista havaita paremmin kestävyysvaikutusten muutoksia kussakin skenaarioissa. Menetelmää on mahdollista tarkentaa esimerkiksi tutkimalla eri energiapuulajikkeiden vaikutuksen metsähakkeen tuotannon materiaalivirtaan. Myös tarkemmalla aineistolla metsähakepotentiaalın sijainneista voidaan parantaa analyysiin luotettavuutta, joka tulisi kyseeseen erityisesti toteutettaessa samanlaista selvitystä pienemmällä tutkimusalueella.

Logistiikan tarkastelua on mahdollista laajentaa koskemaan rautatiekuljetuksia rekkaliikenteen lisäksi multimodaalisen liikenneverkkoaineiston avulla, jolloin eri tuotantomuotojen kestävyysvaikutukset voidaan ottaa yhä tarkemmin huomioon. Logistiikan näkökulmasta olisi mielenkiintoista syventyä lisää erityisesti alueelliseen tiestön kuormituksen vaihteluun. Onnettomuusaineistoa voisi tarkastella yhdessä liikennemäärien avulla, jolloin voitaisiin laskea tarkemmin logistiikan vaikutuksia sosiaaliseen kestävyYTEEN onnettomuusriskin näkökulmasta. Tähän voisi yhdistää myös muuta aineistoa, esimerkiksi asutusaineistosta voisi saada lisämuuttujia sosiaalisen kestävyYDEN analysointiin metsähakkeen tuotannon logistiikassa.

ToSIA-työkalun ja paikkatietomenetelmien yhdistämisen mahdollisuudet tulisivat vielä paremmin esiin, jos tutkimus tehtäisiin laajemmalle tutkimusalueelle. Tällöin voitaisiin analysoida ToSIA:lla saatavia tuloksia esimerkiksi maakunnittain ja vertailla työllisyysvaikutuksia paikkatietopohjaisen työssäkäyntiliikenteen aineiston kanssa.

## LÄHTEET

- Ahonen, E. (2004). Metsähakkeen energiakäytön työllisyys- ja tulovaikutukset – Case tutkimus. *REDEC Kajaani, Working Papers* 47. 61 s.
- Alakangas, E. (2000). Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. *VTT tiedotteita* 2045. 172 s.
- Alastalo, M. & M. Åkerman (2010). Asiantuntijahaastattelun analyysi: faktojen jäljillä. *Teoksessa* Ruusuvuori, J., P. Nikander & M. Hyvärinen (toim.): (2010). *Haastattelun analyysi*, 372–392. Vastapaino, Tampere.
- Anselin, L. (1995). Local indicators of spatial association–LISA. *Geographical Analysis* 27: 2, 9–115.
- Antikainen, R., J. Tenhunen, J. Iloäki, M. Mickwitz, P. Punttila, P. Puustinen, M. J. Seppälä & L. Kauppi (2007). Bioenergian tuotannon uudet haasteet ja niiden ympäristönäkökohdat – Nykytilakatsaus. *Suomen ympäristökeskuksen raportteja* 11/2007. 99s.
- Anttila, P., K.T. Korhonen & A. Asikainen (2009). Forest energy potential of small trees from young stands in Finland. *Teoksessa* M. Savolainen (toim.): *Bioenergy 2009. sustainable bioenergy Business*. 221–226. Book of proceedings part I. FINBION julkaisusarja - FINBIO Publications.
- Anttila, P., A. Asikainen, J. Laitila, M. Broto, I. Campanero, I. Lizzaralde & F. Rodriguez (2011). Potential and supply costs of wood chips from forests in Soria, Spain. *Forest Systems* 20: 2, 245–254.
- Ayres, R. U. (1998). Rationale for a physical account of economic activities. *Teoksessa* Vellinga, P., F. Berkout & J. Gupta (Toim.): *Managing a material world*. Kluwuter Academic Publisher, Dordrecht.
- Bennet, R. J. & R. J. Chorley (1978). *Environmental systems: philosophy, analysis and control*. 624 s. Methuen & Co Ltd, London.
- Brundtland, G. (1987). *Report of the world commission on environmental development: our common future*. United Nations. 247 s.
- Chan, Y. (2011). *Location theory and decision analysis. Analytics of spatial information technology*. 2. p. 701 s. Springer. Berlin
- Chesneau, J. B., E. Le Net & S. Berg (2012). A transport tool to evaluate sustainability impacts of transport processes within the forest wood chain. *European Journal of Forest Research* 131: 1, 73–80.
- Chorley, R. & B. A. Kennedy (1971). *Physical geography: a system approach*. 370. s. Prentice-Hall. International. London.
- Clayton, A. M. & N. J. Radcliffe (1997). *Sustainability: A system approach*. Methuen & Vo. Ltd, London.
- Den Herder, M., M. Kolström, M. Lindner, T. Suominen, D. Tuomasjukka & M. Pekkanen (2012). Sustainability impact assessment on the production and use of different wood and fossil fuels employed for energy production in North Karelia, Finland. *Energies* 2012: 5, 4870–4891.
- Deshpande, N., I. Chanda & S. S. Arkatkar (2011). Accident mapping and analysis using geographical information systems. *International Journal of Earth Sciences and Engineering* 4: 4, 342–345.
- Dijkstra E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik* 1, 269–271.

- Eggleston, S., L. Buendia, M. Kyoko, T. Ngara & K. Tanabe (2006; toim.). *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories, volume 2, energy*. IGES, Japan.
- Ekokumppanit Oy (2011). *Kanta- ja Päijät-Hämeen energiantuotannon ja -käytön taseet vuonna 2008*. Kestävää energiaa Hämeestä -hanke.
- Energiateollisuus ry (2013). Metsäenergia. 5.5.2013. <<http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/metsaenergia>>
- ESRI (2013a). ArcGIS help. Geographic information systems. 17.4.2013. <[http://www.esri.com/what-is-gis/overview#overview\\_panel](http://www.esri.com/what-is-gis/overview#overview_panel)>
- ESRI (2013b). ArcGIS help. Network dataset. 9.9.2013. <[http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Network\\_elements/004700000080000000/](http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/Network_elements/004700000080000000/)>
- ESRI (2013c). ArcGIS help. Network analyst. 17.4.2013. <<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/004700000033000000>>
- ESRI (2013d). ArcGIS help. Spatial Statistics Toolbox. 18.4.2013. <<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#/005p00000010000000>>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2010). Criteria and indicators for sustainable forest management. 17.4.2013. <[www.fao.org](http://www.fao.org)>
- Georgescu-Roegen, N. (1976). *Energy and economic myths: Institutional and analytical economic essays*. 380 s. Pergamon Press, New York.
- Getis, A. & J. K. Ord (1992). The analysis of spatial association by use of distance statistics. *Geographical Analysis* 24: 3, 189–206.
- Gregory, K. J. (2000). *The changing Nature of physical geography*. 367 s. Edward Arnold, London.
- Hagström, M., M. Karttunen, H. Hoviniemi & J. Vanhanen (2012). *Päijät-Hämeen alueella syntyvien biomassojen käsittely*. 63 s. Materiaalien käsittelyllä lisää palveluja ja tekniikkaa Päijät-Hämeeseen (MABU), Lahden tiede- ja yrityspuisto Oy.
- Hesse, M. & J-P. Rodrigue (2004). The transport geography of logistics and freight distribution. *Journal of Transport Geography* 12, 171–184.
- Hillsman, E. L. (1984). The p-median structure as a unified linear model for location-allocation analysis. *Environmental and Planning A* 16, 305–318.
- Hirsjärvi, S., P. Remes, & P. Sajavaara (2009). *Tutki ja kirjoita*. 15 p. 464 s. Kariston kirjapaino Oy, Hämeenlinna.
- Hock, B. K., L. Blomqvist, P. Hall, M. Jack, B. Möller & S. J. Wakelin (2013). Understanding forest derived biomass supply with GIS modelling. *Journal of Spatial Science* 57: 2, 213–232.
- Hugget, R. J. (1980). *System analysis in geography*. 208 s. Oxford University Press, New York.
- Hänninen, H., H. Karppinen, & J. Leppänen (2010). Suomalainen metsänomistaja 2010. *Metlan työraportteja* 208. 1.7.2013. <<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp208.pdf>>
- Ihalainen, T. & A. Asikainen (2010). Kustannustekijöiden vaikutukset bioenergian tuotannon arvoketjuissa. *Metlan työraportteja* 166. 19.7.2013. <<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2010/mwp166.pdf>>
- Impola, R. (2011). Terminaali osana metsäenergian toimitusketjua. 26.9.2013. <[http://www.bioclus.eu/fi/files/BIOCLUS\\_workshop\\_10\\_11\\_2011\\_Risto\\_Impola.pdf](http://www.bioclus.eu/fi/files/BIOCLUS_workshop_10_11_2011_Risto_Impola.pdf)>
- Impola, R. & I. Tiihonen (2011). Biopolttoaineterminaalit. Ohjeistus terminaalin perustamiselle ja käyttämiselle. Terminaalikäsikirja. 26.9.2013. <<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2011/VTT-R-08634-11.pdf>>

- Kariniemi, A., K. Kärhä, T. Heikka, & M. Niininen (2009). Feedstock supply chain CO<sub>2</sub>-eq emissions: A case study on forest biomass for 2nd generation liquid traffic fuel. *Metsätehon Katsaus* 38, 2009. 17.7.2013.  
<[http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Katsaus/Katsaus\\_038\\_Feedstock\\_Supply\\_Chain\\_aka.pdf](http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Katsaus/Katsaus_038_Feedstock_Supply_Chain_aka.pdf)>
- Koisti, O.-P. (2011). Käyttökohdeselvitys puun energiajakeiden käytöstä Kanta- ja Päijät-Hämeessä 2009. *Teoksessa* Koisti, O.-P., J. Rantala & A. Laine (toim.): *Metsä- ja peltoenergiaselvitys 2011*, 6–37. Multiprint Oy, Hämeen bioenergiahanke II.
- Korpilahti, A. & O. H. Koskinen (2012). Puutavaran autokuljetus tehokkaammaksi. *Metsätehon tulosalvosarja 2/2012*. 24.4.2013.  
<[http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja\\_2012\\_01\\_Puutavaran\\_autokuljetus\\_tehokkaammaksi\\_ak.pdf](http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2012_01_Puutavaran_autokuljetus_tehokkaammaksi_ak.pdf)>
- Korpilahti, A. & S. Suuriniemi (2001). Käyttöpaikalla haketukseen perustuva puupolttolaitteentuotanto. 46 s. *Metsätehon raportti 122*. Helsinki.
- Korvenranta, M. (2013). Selvitys Päijät-Hämeen seudullisesti merkittävistä materiaalinkäsittelyterminaaleista. Päijät-Hämeen liitto.
- Kärhä, K. (2008). Metsähakkeen tuotantoprosessikuvaukset. *Metsätehon tulosalvosarja 3/2008*. 25.8.2013.  
<[http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja\\_2008\\_03\\_Metsahakkeen\\_tuotantoprosessi\\_kk.pdf](http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2008_03_Metsahakkeen_tuotantoprosessi_kk.pdf)>
- Kärhä, K., M. Strandström, P. Lahtinen & J. Elo (2009). *Metsähakkeen tuotannon resurssitarve Suomessa vuonna 2020*. *Metsätehon tulosalvosarja 10/2009*. 18.4.2013  
<[http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja\\_2009\\_10\\_Metsahakkeen\\_tuotannon\\_resurssitarve\\_kk.pdf](http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2009_10_Metsahakkeen_tuotannon_resurssitarve_kk.pdf)>
- Lahti Energia Oy (2013). *Lahti Energia Bio2020-hanke. Ympäristövaikutusten arviointiohjelma*. 76 s. Lahti.
- Lahti (2012). Lahden yleiskaava 2025. 18.4.2013. <<http://www.lahti.fi/yleiskaava>>
- Laitila, J., A. Asikainen & K. Pasanen (2012). Hankinnan teknologia, logistiikka ja hiilidioksidipäästöt. *Metlan työraportteja 240*. 19.7.2013.  
<[http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240\\_3\\_3.2.pdf](http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240_3_3.2.pdf)>
- Laitila, J., A. Leinonen, M. Flyktman, & M. Virkkunen (2010). Metsähakkeen hankinta- ja toimituslogistiikan haasteet ja kehittämistarpeet. *VTT tiedotteita 2564*. 149 s. Edita Prima Oy, Helsinki
- Laitila, J., A. Asikainen & P. Anttila. (2008). Energiapuuvarat. *Teoksessa*: Kuusinen, M. & H. Ilvesniemi. (toim.): *Energiapuun korjuun ympäristövaikutukset*, 6–12 s. Tapion ja Metlan julkaisuja. 18.4.2013. <[www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti](http://www.metsavastaa.net/energiapuu/raportti)>
- Laitila, J. (2006). Cost and sensitive analysis tools for forest energy procurement chains. *Forestry Studies, Metsäanduslikud Uurimused* 45. 19.7.2013.  
<[http://mi.emu.ee/userfiles/MI/FSMU/2006/45/Mets\\_45\\_01\\_Laitila.pdf](http://mi.emu.ee/userfiles/MI/FSMU/2006/45/Mets_45_01_Laitila.pdf)>
- Liikennevirasto (2013). Raskaan liikenteen enimmäismittojen ja –massojen korotus lisää rajoituksia. 17.11.2013.  
<[http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/ uutiset/2013/2013\\_910/01102013\\_massatjamitat](http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/ uutiset/2013/2013_910/01102013_massatjamitat)>
- Liimatainen, T. (2010). *Metsäenergia Päijät-Hämeessä*. 41 s. Materiaalien käsittelyllä lisää palveluja ja tekniikkaa Päijät-Hämeeseen (MABU), Lahden tiede- ja yrityspuisto Oy.
- Lindner, M., T. Suominen, T. Palosuo, J. Garcia, P. Verweij, S. Zudin & R. Päivinen (2009). *ToSIA – A tool for sustainability impact assessment of forest-wood-chains*. 20s. European Forest Institute. Joensuu.



- Lindner, M., T. Suominen, T. Palosuo, J. Carcia-Conzalo, P. Verweij, S. Zudin, R. Päivinen (2010). ToSIA – A tool for sustainability impact assessment of forest-wood-chains. *Ecological Modelling* 221: 18, 2197–2205.
- Lohilahti, H., T. Hoikkanen, J. Aho, T. Kolström & A. Mustonen (2009; toim.). Ilmastonmuutos Pohjois-Karjalan mahdollisuutena. *Pohjois-Karjalan liitto, Julkaisu 124*. 69 s. Jyväskylä.
- Lähdevaara, H., V. Savolainen, M. Paananen & A. Vanhala (2010). Mailta ja mannuilta, soilta ja saloilta. Selvitys Keski-Suomen biomassakuljetusten logistiikasta. *Jyväskylän ammattikorkeakoulun julkaisuja 107*. 141 s. Jyväskylä.
- Metsäntutkimuslaitos (2012). *Metsätilastollinen vuosikirja 2012*. 452 s. Vantaa.
- Mitchell, A. (2005). *The Esri guide to GIS analysis, volume 2: spatial measurements & statistics*. 239 s. Esri press, Redlands California.
- Mitchell, A. (2012). *The Esri guide to GIS analysis, volume 3: Modeling suitability, movement, and interaction*. 410 s. Esri Press, Redlands California.
- Møller-Jensen, L. (1998). Assessing spatial aspects of school location-allocation in Copenhagen. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography* 98: 1, 71–80.
- Ness, B., E. Piirsalu-Urbel, S. Anderberg & L. Olsson (2007). Categorising tools for sustainability assessment. *Ecological economics* 60: 3. 498–508.
- European Forest Institute (2013). Northern Tosia 24.7.2013.  
<<http://www.northerntosia.org/portal/>>
- Ojanen, T. (2012). *Päijät-Hämeen ilmasto- ja energiaraportin taustaraportti*. 50 s. Päijät-Hämeen liitto.
- Okkonen, L. (2009). System evolution of waste and by-product management and bioenergy production. *Joensuun yliopiston yhteiskuntatieteellisiä julkaisuja nro 98*. 166s.
- Ord, J. K. & A. Getis (1995). Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. *Geographical Analysis* 27: 4, 286–306.
- Paananen, M. (2005). Metsähakkeen tuotannon työllistävyys Keski-Suomessa 1995–2004. *Bioenergiakeskuksen julkaisusarja (BDC-Publications) nro 18*. 11 s. Jyväskylä.
- Perälä, T., M. Perälä & M. Myllylä (2011). *Bioterminaalien liiketoimintaselvitys*. 59 s. Navico Oy.
- Pihlaja, J. (2004). *Tutkielman ongelmia ratkaisemaan*. 224 s. Vammalan Kirjapaino Oy, Vammala.
- Pisto, S., N. Huikuri & P. Kupari (2011). Kiinteän bioenergian terminaaliverkosto selvitys Satakunnassa ja Varsinais-Suomessa. 26.9.2013.  
<[http://www.metsakeskus.fi/fi\\_FI/c/document\\_library/get\\_file?uuid=e7cf597f-0f35-4e6b-987a-e41eb1164e37&groupId=10156](http://www.metsakeskus.fi/fi_FI/c/document_library/get_file?uuid=e7cf597f-0f35-4e6b-987a-e41eb1164e37&groupId=10156)>
- Pülzl, H., I. Prokofieva, S. Berg, E. Rametsteiner, F. Aggestam & B. Wolfslehner (2012). Indicator development in sustainability impact assessment: balancing theory and practice. *European Journal of Forest Research* 131: 1, 35–46.
- Quariguasi Frota Neto, H. J. M., J. A. E. E. Bloemhof-Ruwaard, van Nunen & E. van Heck (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics* 111, 195–208.
- Rantala, J. (2011). Energiapuun lisäämisen mahdollisuudet Hämeessä vuoteen 2015. *Teoksessa Koisti, O.-P. J. Rantala & A. Laine (toim.): Metsä- ja peltoenergiaselvitys 2011*, 38–67. Multiprint Oy, Hämeen bioenergiahanke II.
- Ratinen, I. (2005). *Fish farming as a local geographic system*. The Case of Kustavi, Finland. *Joensuun yliopiston julkaisuja 11*. 278 s.
- Rodrigue, J.-P., C. Comtois & B. Slack (2006). *The geography of transport systems*. 284 s. Routledge, New York.

- Rodrigue, J.-P., C. Comtois & B. Slack (2013). *The geography of transport systems*. 3. p. 411 s. Routledge, New York.
- Seppänen, N. (2011). Valtimon bioterminaali. 26.9.2013.  
<[http://www.pikes.fi/c/document\\_library/get\\_file?uuid=ef9fcb69-4ad5-4584-af7d-1b31d760207c&groupId=69174](http://www.pikes.fi/c/document_library/get_file?uuid=ef9fcb69-4ad5-4584-af7d-1b31d760207c&groupId=69174)>
- Strandström, M. (2012). Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2011. *Metsätehon tulosalvosarja 4/2012*. 24.9.2013.  
<[http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja\\_2012\\_04\\_Metsahakkeen\\_tuotantoketjut\\_2011\\_ms.pdf](http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tulosalvosarja/Tulosalvosarja_2012_04_Metsahakkeen_tuotantoketjut_2011_ms.pdf)>
- Ympäristöministeriö (2013). Kestävä kehitys. 22.9.2013. <<http://www.ymp.fi/kestavakehitys>>
- Tahvanainen, T. & P. Anttila (2011). Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland. *Biomass & Bioenergy* 35, 3360–3375.
- Teitz, M. B. & P. Bart (1968). Heuristics methods for estimating the generalized vertex median of weighted graph. *Operations Research* 16: 5, 955–961.
- Tobler, W. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography* 46: 2, 234–240.
- Tuomi, J. & A. Sarajärvi (2002). *Laadullinen tutkimus ja sisällönanalyysi*. 159 s. Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä.
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2013). Kansallinen ilmasto- ja energiastrategia, taustaraportti. 24.4.2013. <[http://www.tem.fi/files/36279/Kansallinen\\_energia-\\_ja\\_ilmastostrategia\\_taustaraportti.pdf](http://www.tem.fi/files/36279/Kansallinen_energia-_ja_ilmastostrategia_taustaraportti.pdf)>
- Uusikallio, V. (2012). Uusi jätti-investointi odottaa. *Etelä-Suomen Sanomat* 15.11.2012
- Valtioneuvoston asetus ajoneuvon käytöstä tiellä annetun asetuksen muuttamisesta 407/2013.
- Väkeväinen, J. (2010). Katsaus biopolttoaineterminaalienmahdollisiin sijaintipaikkoihin Pohjois-Karjalassa. 26.9.2013.  
<<http://www.karelia.fi/biostuli/materiaalit/Katsaus%20biopolttoaineterminaalien%20mahdollisiin%20sijaintipaikkoihin.pdf>>
- WSP Finland Oy (2012a). *Terminaalialueiden kartoitus Päijät-Hämeessä*. Vaiheen 1 raportointi. Materiaalinkäsittelyllä lisää palveluja ja tekniikkaa Päijät-Hämeeseen (MABU)-hanke. Lahden tiede- ja yrityspuisto Oy.
- WSP Finland Oy (2012b). *Terminaalialueiden kartoitus Päijät-Hämeessä*. Vaiheen 3 raportointi. Materiaalinkäsittelyllä lisää palveluja ja tekniikkaa Päijät-Hämeeseen(MABU)-hanke. Lahden tiede- ja yrityspuisto Oy.
- Yin, R. K. (2009). *Case study research. Design and methods*. 4. p. 219 s. SAGE Publications, California.
- Ylitalo, E. (2012). Puun energiakäyttö 2011. *Metsätilastotiedote 16/2012*. 24.4.2013.  
<<http://www.metla.fi/metinfo/tilasto/julkaisut/mtt/2012/puupolttoaine2011.pdf>>
- Äijälä, O., M. Kuusinen & A. Koistinen (2010; toim.). *Hyvän metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen ja kasvatukseen*. 31 s. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja.

## ASiantuntijahaastattelut

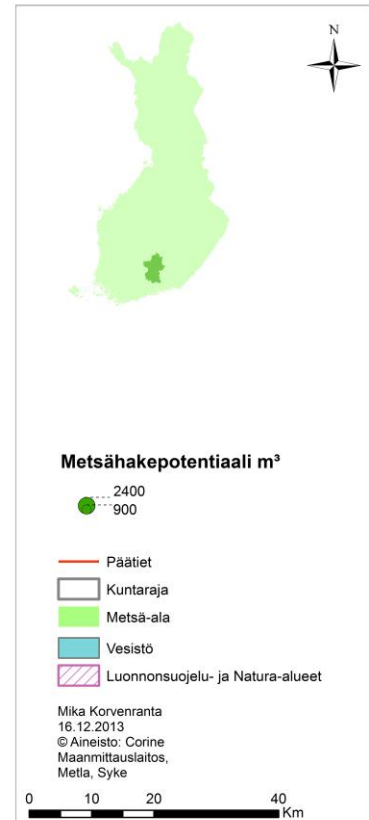
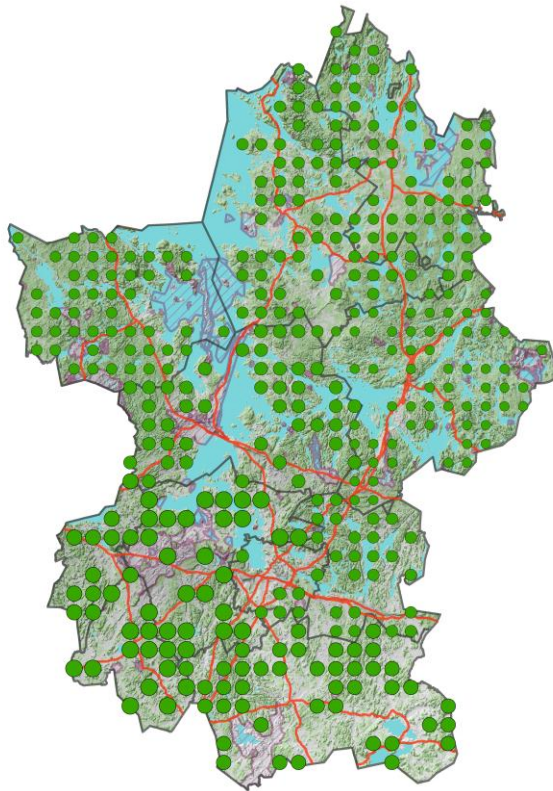
- Alhola, A. (2013). Metsänhoitoyhdistys, energiapuuneuvoja kuljetus- ja logistiikkavastaava. Haastattelu Hollolassa 8.1.2013.
- Haukkala, J.-O. (2013). Biowatti Oy, operaatiopäällikkö. Haastattelu Ylöjärvellä 25.1.201
- Haverinen, J. (2013). Lahti energia Oy, johtaja, polttoaineet ja energiakauppa. Haastattelu Lahdessa 8.1.2013.
- Hertsu, J. (2013). Päijät-Hämeen liitto, aluekehityspäällikkö. Haastattelu Lahdessa 9.1.2013.
- Hyvärinen, J. (2013). Koskisen Oy, bioenergiapäällikkö. Haastattelu Kärkölässä 10.1.2013.
- Itkonen, R. & P. Heikkinen (2013). ELY-keskus, ylitarkastaja ja yksikön päällikkö. Haastattelu Hämeenlinnassa 10.1.2013.
- Koisti, O.-P. (2013). Metsäkeskus Häme-Uusimaa, bioenergiapäättö. Haastattelu Hämeenlinnassa 11.1.2013.
- Mäkelä, A. (2013). Lahden Seudun Kehitys LADEC Oy, projektipäällikkö. Haastattelu Lahdessa 25.1.2013
- Nylén, J. (2013). Fortum Power and Heat Oy, hankintapäällikkö, polttoaineet. Haastattelu sähköpostitse. 21.1.2013.
- Sarkki, A. (2013). Metsänomistajien liitto, asiantuntija. Haastattelu Lahdessa 9.1.2013.

## LIITTEET

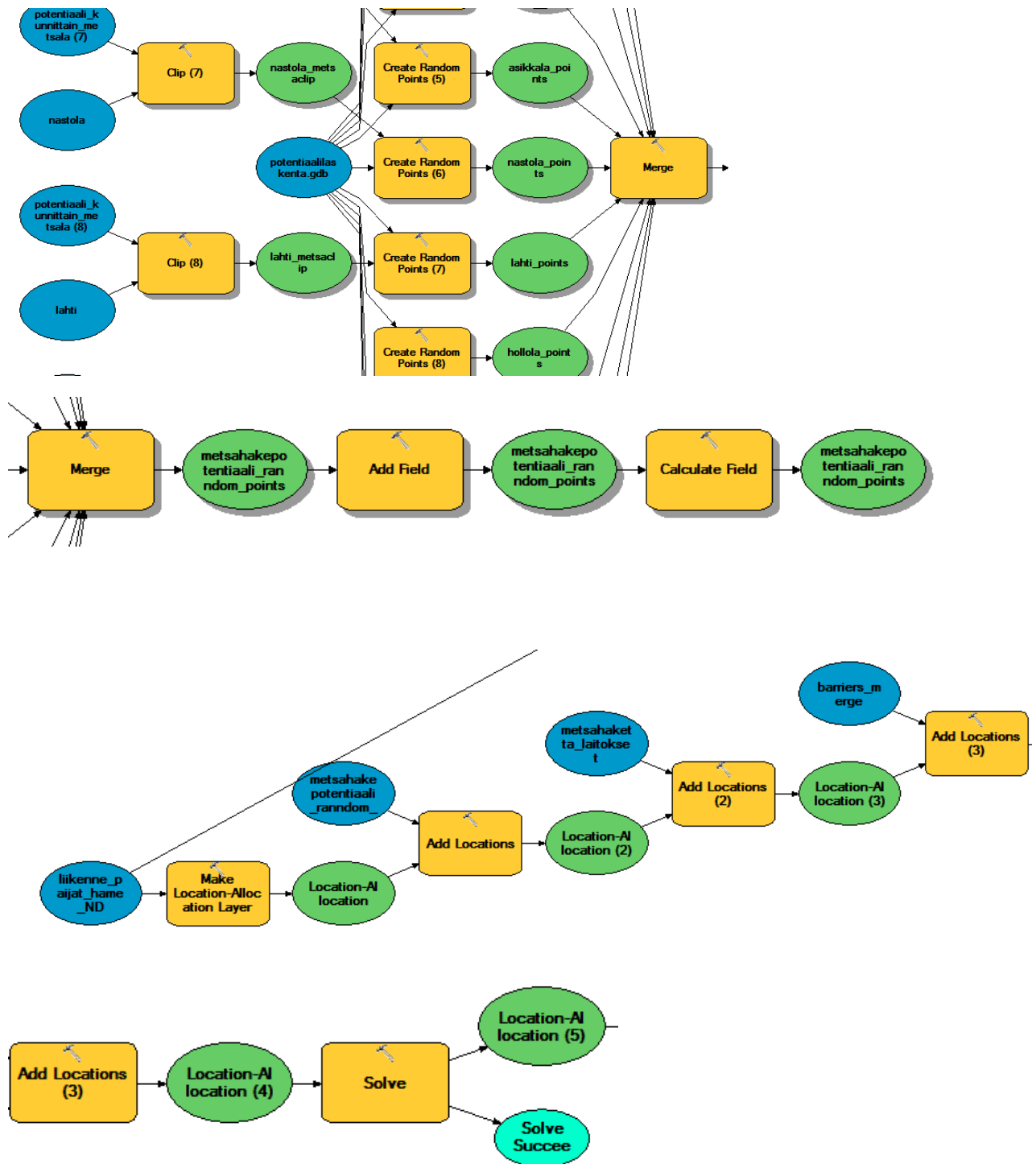
### LIITE 1. Käytetyt lyhenteet ja muuntokertoimet.

TWh	= Terawattitunti
GWh	= Gigawattitunti
MWh	= Megawattitunti
m <sup>3</sup>	= Kiintokuutiometri
i-m <sup>3</sup>	= Irtokuutiometri
ToSIA-työkalu	= A Tool for Sustainability Impact Assessment
FWC	= Forestry Wood Chain
Co2 –ekv.	= Hiilidioksidiekvalentti
1 TWh	= 1000 GWh
1 GWh	= 1000 MWh
1 m <sup>3</sup> puuta	= 2,5 i-m <sup>3</sup> haketta
1 i-m <sup>3</sup> haketta	= 0,4 m <sup>3</sup> puuta
1m <sup>3</sup> puuta	= 2 MWh
1 i-m <sup>3</sup> haketta	= 0,8 MWh
1 m <sup>3</sup> haketta	= 867 kg

**LIITE 2.** Metsähakepotentiaali suhteessa metsäalaan kunnittain tarkasteltuna Päijät-Hämeessä.



**LIITE 3.** Mallit metsähakepotentiaaliaineiston prosessoinnista ja logistiikan materiaaliavirran optimoinnista.



#### **LIITE 4. Asiantuntijahaastatteluiden kysymykset.**

##### **Metsähakkeen tuotanto / Yritykset**

1. Kuinka paljon yrityksessä käytetään metsähaketta? Päijät-Hämeen alueella?
2. Miten arvioit tilanteen muuttuvan vuoteen 2035?
3. Mitkä ovat suurimmat tekijät metsähakkeen tuotannon kehittymiseen ja miten tuotannon kehittämiseen voidaan vaikuttaa?
4. Mitä tekijöitä otetaan huomioon logistiikan suunnittelussa? Mitä tekijöitä voitaisiin ottaa vielä huomioon?
5. Käytetäänkö yrityksessä paikkatietomenetelmiä logistiikan suunnitteluun? Mitä ohjelmia?
6. Tiedättekö suunnitelluista metsähaketta käyttävistä lämpölaitoksista tai terminaaleista?

##### **Metsähakkeen tuotanto / Metsäalan edustajat**

1. Mikä on metsähakkeen tuotannon nykytila Päijät-Hämeessä?
  - 1b) Onko metsähakkeen tuotannolla ja käytöllä eroa Päijät-Hämeessä?
2. Miten arvioit metsähakkeen tuotannon kehittymistä vuoteen 2035 mennessä Päijät-Hämeessä?
3. Mitkä tekijät vaikuttavat metsähakkeen tuotannon kehittymiseen ja miten tuotannon kehittymiseen voidaan vaikuttaa?
4. Mikä on eri tuotantoketjujen osuudet Päijät-Hämeessä ja miten arvioit tilanteen muuttuvan tulevaisuudessa?
5. Missä nykyiset metsähaketerminaalit sijaitsevat Päijät-Hämeen alueella?
  - 5b) Onko teillä tiedossa suunniteltuja metsähaketerminaaleja tai lämpölaitoksia Päijät-Hämeen alueella?
6. Mikä on metsänomistajien asema metsähakkeen tuotannon kehittämisessä?

##### **Metsähakkeen tuotanto / Aluekehityksen asiantuntijat**

1. Miten metsähakkeen tuotanto otetaan huomioon suunnittelussa Päijät-Hämeessä?
2. Miten arvoit tilanteen muuttuvan vuoteen 2035 mennessä Päijät-Hämeessä?
3. Mitkä tekijät vaikuttavat metsähakkeen tuotannon kehittymiseen ja miten tuotannon kehittymiseen voidaan vaikuttaa?
4. Onko Päijät-Hämeen alueella metsähakkeen tuotannon logistiikasta johtuvia erityisesti huomioitavia alueita? (esim. liikenteen näkökulmasta)? Muuttuuko tilanne tulevaisuudessa?

4b) Jos on miten ongelmakohtien sijaintia ja määrää voidaan arvioida?

5. Miten metsähakkeen tuotannon yhteiskunnallisten vaikutusten arviointia voitaisiin kehittää?
6. Tiedätkö suunniteltuja metsähaketta käyttäviä lämpölaitoksia tai terminaaleja?

### **Metsähakkeen tuotannon logistiikan kestävyysvaikutukset**

7. Määrittele metsähakkeen tuotantoon liittyviä tekijöitä? suurimmat ongelmakohdat?
  - sosiaalisen kestävyuden näkökulmasta?
  - taloudellisen kestävyuden näkökulmasta
  - ekologisen kestävyuden näkökulmasta?
8. Miten eri tuotantoketjut eroavat kestävyysvaikutuksiltaan logistiikan osalta?
9. Miten metsähaketta voidaan tuottaa kestävämmiin?
10. Miten metsähakkeen tuotannon lisääminen vaikuttaa kestävyysvaikutuksiin?
11. Miten metsähaketerminaalit vaikuttavat kestävyysvaikutuksiin?
12. Mille alueille kohdistuu suurin kuormitus metsähakkeen tuotannon johdosta?
13. Kuinka paljon metsähakkeen tuotantoa voidaan lisätä kestävästi Päijät-Hämeessä?

### **Metsähaketerminaalien sijoittelu**

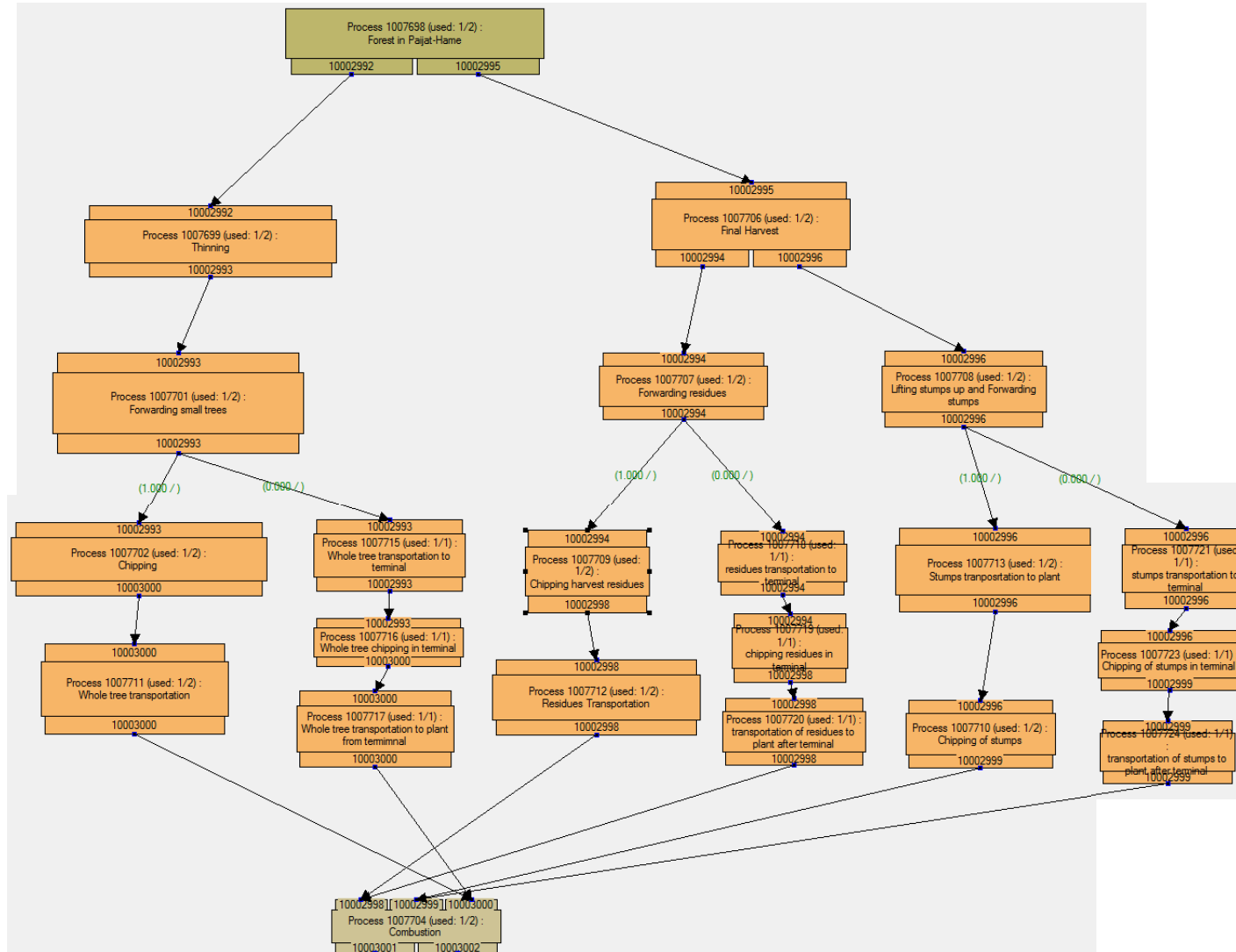
14. Mitkä tekijät vaikuttavat terminaalien sijoitteluun?
15. Onko olemassa tiettyjä raja-arvoja terminaalien sijoittamiseen (esim. etäisyys asutuksesta)?
16. Kannatko ison terminaalin kokonaisuutta vai useampia pienempiä terminaaleja ja miksi?
17. Voiko maankäsittely- ja jätteenkäsittelypaikkoja yhdistää metsähaketerminaalien kanssa? (keskitetty vai hajautettu malli)
18. Mitä tekijöitä tulee ottaa huomioon keskittämisessä ja hajauttamisessa?
19. Mihin kartalla sijoittaisit metsähaketerminaalit Päijät-Hämeessä? Tee optimaalinen terminaaliverkosto. Lähtötietoina metsähakepotentiaali kunnittain, suhteellisesti pisteittäin ja lämpölaitosten ja kartoitetuiden mahdollisten terminaalien sijainnit.



**Liite 5.** Prosessien indikaattoriarvot ToSIA-työkälussa ja niiden lähteet.

Prosessi	Yksikkö	Energiapuu	Tuotantokustannukset (Euro)	Työllisyys (henkilötyövuosi)	Kasvihuonekaasut (kg hiilidioksidiekvivalentti)	Lähteet
1	ha					Rantala 2011
2	m <sup>3</sup>		8,62	4,1 x 10 <sup>-4</sup>	6	Ahonen 2004; Paananen 2005; Kariniemi ym. 2009; den Herder ym. 2012
3	m <sup>3</sup>		4,11		1,68	Ahonen 2004; Paananen 2005; Kariniemi ym. 2009; den Herder ym. 2012
4	m <sup>3</sup>		10	2,1 x 10 <sup>-4</sup>	4	Ahonen 2004; Paananen 2005; Kariniemi ym. 2009; den Herder ym. 2012,
5	m <sup>3</sup>		8,1	7,4 x 10 <sup>-4</sup>	3,36	Ahonen 2004; Paananen 2005; Kariniemi ym. 2009; Den Herder ym.
6	m <sup>3</sup>		13,4	1,38 x 10 <sup>-4</sup>	13,23	Laitila ym. 2007; Kariniemi ym. 2009, Kärhä ym. 2009
7	m <sup>3</sup>	Pienpuu	5	1,1 x 10 <sup>-5</sup>	4,8	Ahonen 2004; Paananen 2005; Kariniemi ym. 2009; Ihalainen & Asikainen 2010
7	m <sup>3</sup>	Hakkuutähde	5,9	3,9 x 10 <sup>-5</sup>	4,76	Ahonen 2004; Paananen 2005; Kariniemi ym. 2009; Ihalainen & Asikainen 2010
8	m <sup>3</sup>	Pienpuu 2009	1,0152	9,03528 x 10 <sup>-6</sup>	0,9588	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
8	m <sup>3</sup>	Hakkuutähde 2009	1,76	1,40976 x 10 <sup>-5</sup>	1,76	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
8	m <sup>3</sup>	Kannot 2009	1,76	1,40976 x 10 <sup>-5</sup>	1,76	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
8	m <sup>3</sup>	Pienpuu 2035	1,41	1,25208 x 10 <sup>-5</sup>	1,33104	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
8	m <sup>3</sup>	Hakkuutähde 2035	2,2	1,9536 x 10 <sup>-5</sup>	2,0768	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
8	m <sup>3</sup>	Kannot 2035	2,2	1,9536 x 10 <sup>-5</sup>	2,0768	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
9	m <sup>3</sup>	Pienpuu	3,5	1,2 x 10 <sup>-5</sup>	6,21	Kariniemi ym. 2009; Kärhä ym. 2009; Ihalainen & Asikainen 2010
9	m <sup>3</sup>	Hakkuutähde	3,5	1,2 x 10 <sup>-5</sup>	6,21	Kariniemi ym. 2009; Kärhä ym. 2009; Ihalainen & Asikainen 2010
9	m <sup>3</sup>	Kannot	7	1,2 x 10 <sup>-5</sup>	6,21	Kariniemi ym. 2009; Kärhä ym. 2009; Ihalainen & Asikainen 2010
10	m <sup>3</sup>	Pienpuu 2009	1,21	1,08 x 10 <sup>-5</sup>	1,15	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
10	m <sup>3</sup>	Hakkuutähde 2009	1,21	1,08 x 10 <sup>-5</sup>	1,15	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
10	m <sup>3</sup>	Kannot 2009	2,1296	1,9008 x 10 <sup>-5</sup>	2,024	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
10	m <sup>3</sup>	Pienpuu 2035	1,3	1,15 x 10 <sup>-5</sup>	1,23	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
10	m <sup>3</sup>	Hakkuutähde 2035	1,3	1,15 x 10 <sup>-5</sup>	1,23	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
10	m <sup>3</sup>	Kannot 2035	2,288	2,024 x 10 <sup>-5</sup>	2,1648	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
11	m <sup>3</sup>	Pienpuu 2009	2,25	2,01 x 10 <sup>-5</sup>	2,14	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
11	m <sup>3</sup>	Hakkuutähde 2009	2,25	2,01 x 10 <sup>-5</sup>	2,14	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
11	m <sup>3</sup>	Kannot 2009	2,25	2,01 x 10 <sup>-5</sup>	2,14	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
11	m <sup>3</sup>	Pienpuu 2035	1,74	1,54 x 10 <sup>-5</sup>	1,65	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
11	m <sup>3</sup>	Hakkuutähde 2035	1,74	1,54 x 10 <sup>-5</sup>	1,65	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
11	m <sup>3</sup>	Kannot 2035	1,74	1,54 x 10 <sup>-5</sup>	1,65	Chesneau e al. 2012; Laitila ym. 2012
12	m <sup>3</sup>		3	1,2 x 10 <sup>-5</sup>	6,21	Kariniemi ym. 2009; Kärhä ym. 2009; Ihalainen & Asikainen 2010
13	KWh			4,3 x 10 <sup>-8</sup>	0,007757395	Eggleston ym. 2006; Kariniemi ym. 2009

**Liite 6.** Tienvarsi- ja terminaalihaketuksen tuotantoketjut ToSIA-työkalulla mallinnettuna.



**Liite 7. ToSIA-työkalulla tehtyjen kestävyysvaikutusarvioitien prosessikohtaiset tulokset.**

		Roadside chipping	Roadside chipping	Roadside chipping	Terminal chipping	Both chains	Both chains	Both chains	Both chains
Scenario	Indicator	chipping small tree roadside	chipping harvest residues roadside	chipping of stumps at the plant	chipping of stumps in terminal	final harvest	forwarding residues	forwarding small trees	lifting stumps and forwarding
Roadside chipping 2009	Production costs/euro	283399,9997	295708,0017	91199,99879		330937,2	405972,0028	566800	407359,995
Roadside chipping 2009	Employment/person years	0,623479999	1,954680011	0,364799995			3,708880025	11,9028	4,195199948
Roadside chipping 2009	Greenhouse gas emissions (kg CO2 eq.)	272063,9997	238571,2014	188783,9975		135273,6	168403,2012	226720	402191,995
Terminal chipping 2009	Production costs/euro				212799,9972	330937,2	405972,0028	566800	407359,995
Terminal chipping 2009	Employment/person years				0,364799995		3,708880025	11,9028	4,195199948
Terminal chipping 2009	Greenhouse gas emissions (kg CO2 eq.)				188783,9975	135273,6	168403,2012	226720	402191,995
Roadside chipping 2035	Production costs/euro	314939,9997	494998,7995	182447,9998		633811,32	756507,6	629880	814934,4
Roadside chipping 2035	Employment/person years	0,692867999	3,642443996	0,729791999			6,911304	13,22748	8,392608
Roadside chipping 2035	Greenhouse gas emissions (kg CO2 eq.)	302342,3997	444564,9596	377667,3596		259076,16	313810,56	251952	804595,68
Terminal chipping 2035	Production costs/euro				425711,9996	633811,32	756507,6	629880	814934,4
Terminal chipping 2035	Employment/person years				0,729791999		6,911304	13,22748	8,392608
Terminal chipping 2035	Greenhouse gas emissions (kg CO2 eq.)				377667,3596	259076,16	313810,56	251952	804595,68

Roadside chipping	Roadside chipping	Both chains	Terminal chipping	Roadside chipping	Terminal chipping	Terminal chipping	Terminal chipping	Terminal chipping	Terminal chipping	Terminal chipping
Residues transportation	Stumps transportation to plant	Thinning	Whole tree chipping in terminal	whole tree transportation	whole tree transportation to plant	whole tree transportation to terminal	chipping residues in terminal	residues transportation to terminal	stumps transportation to terminal	residues to plant
60645,20036	64739,83914	488581,6		68582,79993						
0,541296003	0,577843192	23,259205		0,571334399						
57638,00034	61529,59918	340080		65181,99993						
		488581,6	198379,9998		127529,9999	57541,53594	175420,001	88211,20052	53503,99929	112770,0007
		23,2388	0,680159999		1,139267999	0,51211967	0,601440004	0,706574723	0,428568858	1,007412006
	6,15E-05	340080	351982,7996		121295,1999	54344,78394	311245,2018	88211,20052	53503,99929	107256,8006
121414,7999	139147,0079	542956,56		81884,39992						
1,074053999	1,230915839	25,82508		0,692867999						
114877,0799	131654,4767	377928		77475,23992						
		542956,56	220457,9998		109599,1199	88813,07991	326885,9997	205471,1998	133795,1999	162509,0398
		25,82508	0,755855999		0,970015199	0,78866015	1,120751999	1,824584254	1,188101375	1,438298399
		377928	391155,4796		103930,1999	83839,54744	579989,1594	193964,8126	126302,6687	154103,3998

Terminal chipping	Both chains			
stumps trans to plant	combustion	Total	Indicator value	Indicator value
		3063926,638	11,1659134	11.17 e/MWh
	11,7992	59,49871837	0,21683206	0.216 person years/GWh
	2116818,678	4273256,273	15,5730914	15.57 kg/MWh
68399,99909		3294207,532	12,0051295	12.00 e/MWh
0,468159994	11,7992	60,75338323	0,22140446	0.22 person years/GWh
65055,99913	2116818,678	4731167,458	17,2418639	17.242 kg/MWh
		4712922,887	10,84927	10.85 e/MWh
	18,6792	81,09861383	0,1866911	0.186 person years/GWh
	3369812,215	6825756,131	15,7130666	15.71 kg/MWh
105819,8399		5157153,36	11,8719	11.87 e/MWh
0,936566399	18,6792	82,78829778	0,1905808	0.19 person years/GWh
100346,3999	3369812,215	7488473,644	17,2386594	17.239 kg/MWh