

PEKKA IIKKANEN  
SIRKKA KESKINEN  
ANTTI KORPILAHTI  
TAPIO RÄSÄNEN  
ARI SIRKIÄ

# Energiapuuvirtojen valtakunnallinen optimointimalli

MALLIN KUVAUS JA KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET





Pekka Iikkanen, Sirkka Keskinen, Antti Korpilahti,  
Tapio Räsänen, Ari Sirkiä

# Energiapuuvirtojen valtakunnallinen optimointimalli

Mallin kuvaus ja käyttömahdollisuudet

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2011

Liikennevirasto  
Helsinki 2011

*Kannen kuva: Mikko Havumäki*

ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6656  
ISBN 978-952-255-678-3

Verkojulkaisu pdf ([www.liikennevirasto.fi](http://www.liikennevirasto.fi))

ISSN-L 1798-6656  
ISSN 1798-6664  
ISBN 978-952-255-679-0

Kopijyvä Oy  
Kuopio 2011

Liikennevirasto  
PL 33  
00521 HELSINKI  
Puhelin 020 637 373

**Pekka Iikkanen, Sirkka Keskinen, Antti Korpilahti, Tapio Räsänen, Ari Sirkiä: Energiapuuvirtojen valtakunnallinen optimointimalli.** Liikennevirasto, liikennejärjestelmäosasto. Helsinki 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 25/2011. 28 sivua. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-678-3, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-679-0 (pdf).

**Avainsanat:** bioenergia, metsähake, kuljetukset, mallintaminen

## Tiivistelmä

Vuonna 2010 metsäenergiaa käytettiin Suomen lämpö- ja voimavoimalaitoksissa yhteensä 12,5 terawattituntia. Metsätehon ja Pöyryn selvitysten mukaan energiapuun käyttö tulee lähes kaksinkertaistumaan 21,6 terawattituntiin vuoteen 2020 mennessä. Energiapuuta on suunniteltu käytettäväksi myös biopolttoainelaitosten raaka-aineena. Energiapuun teknis-ekologiseksi tarjontapotentiaaliksi vuonna 2020 on arvioitu 42,9 terawattituntia.

Energiapuuta on kuljetettu lähes yksinomaan maanteitse. Tilanne on kuitenkin muuttumassa, sillä energiapuun kysynnän kasvu laajentaa raaka-aineen hankinta-alueita ja pidentää kuljetusmatkoja. Kustannustehokas kuljetusjärjestelmä edellyttää tällöin myös rautatie- ja vesitiekuljetusten käyttöä. Suomesta puuttuu kuitenkin lähes kokonaan rautatie- ja vesitiekuljetusten käytön edellyttämät terminaalit, joissa energiapuuta haketetaan, välivarastoidaan ja kuormataan junavaunuihin ja aluksiin jatkokuljetusta varten.

Energiapuun kuljetusten valtakunnallinen optimointimalli on kehitetty palvelemaan erityisesti liikennejärjestelmän suunnittelua. Lineaarinen optimointimalli optimoi valtakunnan tasolla metsäenergian tarjontapisteiden ja käyttö pisteiden väliset tavaravirrat metsäenergian hankintakustannuksiin perustuen. Mallissa käsitellään samanaikaisesti metsähakkeen, kantojen ja pienpuun toimituksia. Optimoinnissa käytettävät hankintakustannukset sisältävät energiapuun tienvarsihinnan, haketuksen, kuljetuksen ja terminaalikäsitteilyn kustannukset.

Optimointimallissa kuvattu kuljetusjärjestelmä muodostuu puun tarjontapisteistä (vuoden 2007 kuntien tarkkuus), puun käyttöpaikoista, rautatieterminaaleista sekä näiden välisistä yhteyksistä päätie- ja rataverkkoa pitkin. Malliin voidaan helposti lisätä myös vesitiekuljetusten tarkastelun edellyttämät elementit.

Optimointimallilla voidaan tarkastella esimerkiksi energiapuun kysynnän ja tarjonnan sekä kuljetuskustannusten muutosten vaikutuksia energiapuun tavaravirtoihin, kuljetusmuotojen työnjakoon, liikennejärjestelmän kuormitukseen ja kuljetusten kokonaiskustannuksiin. Mallilla voidaan arvioida myös optimaalisen terminaaliverkon laajuutta ja optimaalisia terminaalien sijaintipaikkoja. Mallin merkittävin hyöty on päätöksenteon taustalla olevien laskelmien luotettavuuden parantuminen, sillä energiapuukuljetusvirtoihin vaikuttavien eri tekijöiden hallinta ilman mallintamista on hyvin vaikeaa.

Tässä työssä laaditulla optimointimallilla tarkasteltiin energiapuun tarjonnan ja kysynnän perusskenaarion mukaisia tavaravirtoja vuonna 2020. Optimointien mukaan suoria tiekuljetuksia tulisi olemaan noin 5,7 milj. tonnia (81,5 %) ja rautatiekuljetuksia noin 1,3 milj. tonnia (18,5 %). Perusskenaario ei sisällä mahdollisten biopolttoainelaitosten energiapuun kysyntää. Tyypillisen biopolttoainelaitoksen energiatarve on noin 4,2 terawattituntia Mikäli biopolttoainelaitoksia toteutetaan, lisää se pitkiä kotimaan raaka-ainekuljetuksia ja rautatiekuljetusten osuutta kuljetuksista. Esimerkiksi Äänekoskelle suunnitellun biopolttoainelaitoksen toteuttaminen kasvattaisi optimointimallin mukaan sekä suoria tiekuljetuksia että rautatiekuljetuksia 0,7 miljoonalla tonnilla vuodessa.

**Pekka Iikkanen, Sirkka Keskinen, Antti Korpilahti, Tapio Räsänen, Ari Sirkiä: Riksomfattande optimeringsmodell för beräkning av energivedflöden.** Trafikverket, Trafiksystemavdelningen. Helsingfors 2011. Trafikverkets undersökningar och utredningar 25/2011. 28 sidor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-678-3, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-679-0 (pdf).

**Nyckelord:** bioenergi, skogsflis, transporter, modellberäkning

## Sammanfattning

År 2010 förbrukades sammanlagt 12,5 terawattimmar skogsenergi vid Finlands kraftvärmeverk och elkraftverk. Enligt Metsätehos och Pöyrys utredningar kommer användningen av energived att nästan fördubblas till 21,6 terawattimmar fram till år 2020. Man planerar även att använda energived som råvara vid framställning av biobränsle. Det i tekniskt och ekologiskt avseende potentiella utbudet av energived uppskattas till 42,9 terawattimmar år 2020.

Energiveden har nästan uteslutande transporterats längs landsväg. Situationen håller emellertid på att förändras, eftersom den ökade efterfrågan utvidgar områdena för energivedsavverkning och förlänger transportsträckorna. Ett kostnadseffektivt transportsystem förutsätter då även användning av järnvägs- och vattenvägstransporter. I Finland saknas emellertid nästan helt terminaler för flisning, mellanlagring och lastning för vidaretransport i järnvägsvagnar och fartyg. Sådana terminaler är en förutsättning för användning av järnvägs- och vattenvägstransporter.

Den riksomfattande optimeringsmodellen för transporter av energived är utvecklad som stöd för särskilt trafiksystemplanering. Den lineära optimeringsmodellen optimerar på rikspanet skogsenergin godsflöden mellan utbuds- och användningsställen utgående från anskaffningskostnad. Modellen hanterar simultant leveranser av skogsflis, stubbar och klenved. I de anskaffningskostnader, som används i modellen, ingår kostnaden för energived som är framkörd till vägkant samt kostnaderna för flisning, transporter och terminalhantering.

Det av optimeringsmodellen beskrivna transportsystemet består av vedens utbudsställen (noggrannheten motsvarar 2007 års kommunindelning), vedens användningsställen, järnvägsterminaler samt förbindelserna mellan dessa längs huvudvägnätet och järnvägsnätet. Det är även lätt att i modellen lägga till de element, som behövs för en granskning av vattenvägstransporter.

Med optimeringsmodellen kan t.ex. undersökas vilka effekter förändringar i efterfrågan på och utbudet av energived samt transportkostnader får på godsflöden av energived, fördelning på transportsätt, belastning av trafiksystemet och transporterernas totala kostnader. Med modellen kan även uppskattas omfattningen av ett optimalt nät av terminaler och den optimala lokaliseringen av terminalerna. Den viktigaste nyttan av modellen är tillförlitligare beräkningar som underlag för beslutsfattande, eftersom det är mycket svårt att utan modellberäkningar hantera de olika faktorer, som påverkar transportflödena av energived.

Med den i detta arbete upprättade optimeringsmodellen undersöktes godsflöden år 2020 i enlighet med basscenariot för utbud av och efterfrågan på energived. Enligt optimeringen skulle de direkta landsvägstransporterna vara ca 5,7 milj. ton (81,5 %) och järnvägstransporterna ca 1,3 milj. ton (18,5 %). I basscenariot ingår inte efterfrågan på energived vid eventuella biobränsleanläggningar. Energibehovet vid en typisk anläggning för framställning av biobränsle är ca 4,2 terawattimmar. I fall biobränsleanläggningar uppförs kommer de långa inrikestransporterna av råvaror att öka och andelen järnvägstransporter kommer att bli större. Uppförandet av t.ex. den planerade biobränsleanläggningen i Äänekoski skulle enligt optimeringsmodellen medföra en ökning av både direkta vägtransporter och järnvägstransporter med 0,7 milj. ton per år.

**Pekka Iikkanen, Sirkka Keskinen, Antti Korpilahti, Tapio Räsänen, Ari Sirkiä: A national optimisation model for energy wood streams.** Finnish Transport Agency, Transport System Department. Helsinki 2011. Research reports of the Finnish Transport Agency 25/2011. 28 pages. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-678-3, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-679-0 (pdf).

**Key words:** bioenergy, forest chips, transports, modelling

## Summary

In 2010 a total of 12,5 terawatt hours of forest energy was used in Finland's heat and power plants. According to studies by Metsäteho and Pöyry, use of energy wood will nearly double to 21.6 terawatt hours by 2020. There also plans to use energy wood as a raw material for biofuel plants. The techno-ecological supply potential of energy wood in 2020 is estimated at 42.9 terawatt hours.

Energy wood has been transported almost entirely by road. The situation is changing, however, because growing demand for energy wood will expand raw wood procurement areas and lengthen transport distances. A cost-effective transport system therefore also requires the use of rail and waterway transports. In Finland, however, there is almost a complete absence of the terminals required for the use of rail and waterway transports; where energy wood is chipped, temporarily stored and loaded onto railway wagons and vessels for further transport.

A national optimisation model for energy wood has been developed to serve transport system planning in particular. The linear optimisation model optimises, on a national level, goods streams between supply points and usage points based on forest energy procurement costs. The model simultaneously covers deliveries of forest chips, stumps and small-sized thinning wood. The procurement costs used in the optimisation include the costs of the energy wood's roadside price, chipping, transport and terminal handling.

The transport system described in the optimisation model consists of wood supply points (2007 municipality precision), wood usage points, railway terminals and the connections between them along the main road and rail network. Elements required for the examination of waterway transports can also be easily added to the model.

The optimisation model can be used to examine, for example, the effects of changes of energy wood demand and supply as well as transport costs on energy wood goods streams, the relative use of different forms of transport, transport system loadings and the overall cost of transports. The model can also be used to estimate the extent of the terminal network and the optimum locations of terminals. The most significant benefit of the model is improving the reliability of calculations that support decision-making, because handling the different factors that influence energy wood transport streams without modelling is very difficult.

The optimisation model formulated in this work was used to examine goods streams in 2020 according to a basic scenario for energy wood supply and demand. According to optimisations, road transports should account for around 5.7 million tonnes (81.5%) and rail transports for around 1.3 million tonnes (18.5%). The basic scenario does not include energy wood demand from possible biofuel plants. The energy need of a typical biofuel plant is around 4.2 terawatt hours. If biofuel plants are implemented, this will increase long domestic raw material transports and the relative proportion of rail transports. For example, the implementation of the biofuel plant planned for Äänekoski would, according to the optimisation model, increase both direct road transports and rail transports by 0.7 million tonnes per year.

## Esipuhe

Metsästä hankittavan energiapuun eli hakkuutähteiden, pienpuun ja kantojen käyttö on nopeasti lisääntymässä energiatuotannossa. Metsäenergiaa tullaan hyödyntämään myös biopolttoaineiden valmistamisessa. Energiapuun haku on hoidettu pääasiassa hankinta-alueella ja kuljetukset hoidettu suorina tiekuljetuksina käyttöpaikoille. Energiapuun kysynnän kasvaessa kilpailu raaka-aineesta kasvaa ja kuljetusmatkat pidentyvät. Tämä mahdollistaa myös rautatie- ja vesitiekuljetusten käytön.

Metsäenergian kysynnän kasvu vaikuttaa liikenneväylien ja terminaalien kuormitusmuutosten kautta liikennejärjestelmän kehittämis- ja ylläpitotarpeisiin. Liikennevirasto päätti tämän vuoksi käynnistää metsäenergian kuljetusten valtakunnallisen optimointimallin kehittämisen. Optimointimallin avulla voidaan arvioida energiapuuvirtojen suuntautumista, käytettäviä kuljetusketjuja ja kuljetuskustannuksia erilaisissa metsäenergian tarjonnan kysynnän skenaarioissa. Liikennevirasto pitää optimointimallin avulla saatavaa tietoa tärkeänä arvioidessaan metsäenergiaan liittyvien toimintaympäristön muutosten vaikutuksia.

Optimointimallin kehittämistyötä ovat ohjanneet rautateiden tavaraliikenteen johtava asiantuntija Timo Välke Liikennevirastosta sekä johtaja Seppo Kosonen Keski-Suomen ELY-keskuksesta.

Optimointimallin ovat laatineet Ramboll Finland Oy ja Metsäteho Oy. Ramboll Finland Oy vastasi lineaarisen optimointimallin kehitystyöstä ja Metsäteho Oy optimointimallin lähtötietoina käytettävien energiapuun tarjonta- ja kysyntätietojen sekä energiapuun hankinta- ja kuljetuskustannusten määrittämisestä. Ramboll Finland Oy:stä työhön osallistuivat DI Pekka Iikkanen (projektipäällikkö), DI Ari Sirkiä ja M.Sc. Karel Capek. Metsäteho Oy:ssä työhön osallistuivat MML Antti Korpilahti, LuK Sirkka Keskinen ja MMM Tapio Räsänen.

Helsingissä toukokuussa 2011

Liikennevirasto  
Liikennejärjestelmätoimiala



# Sisällysluettelo

1	JOHDANTO.....	8
2	OPTIMOINTIMALLIN KUVAUS.....	10
3	LÄHTÖTIEDOT .....	12
3.1	Energiapuun tarjonta ja kysyntä .....	12
3.2	Kuljetus- ja terminaalikustannukset .....	12
4	KULJETUSJÄRJESTELMÄN KUVAUS.....	15
4.1	Kuljetusjärjestelmän osat.....	15
4.2	Kuljetusten reititys ja kuljetusjärjestelmän rajoitukset.....	16
5	OPTIMOINTIMALLIN KÄYTTÖ .....	17
5.1	Skenaarioiden muodostaminen.....	17
5.2	Liikenneverkon kuormitukset.....	17
6	SKENAARIOTARKASTELUT .....	18
6.1	Perusskenaario .....	18
6.1.1	Metsäenergian tarjonta .....	18
6.1.2	Metsäenergian kysyntä .....	18
6.1.3	Tarjonnan ja kysynnän välinen alueellinen tasapaino .....	19
6.1.4	Optimointien tulokset .....	20
6.2	Case: Äänekosken biopolttoainelaitoshanke.....	23
6.2.1	Tarkastelun sisältö.....	23
6.2.2	Hankkeen vaikutukset .....	23
7	MALLIN SOVELTAMISMAHDOLLISUUKSIA.....	26
	KIRJALLISUUSLUETTELO.....	28

# 1 Johdanto

Hallituksen ilmasto- ja energiapolitiikan ministerityöryhmä pääsi 20.4.2010 yhteisymmärrykseen uusiutuvan energian velvoitepaketin sisällöstä. EU-velvoitteen mukaisesti Suomen on käytännössä lisättävä uusiutuviin energiamuotoihin perustuvaa energiantuotantoa vuoteen 2020 mennessä yhteensä 38 terawattitunnilla (TWh).

Hallitus arvioi energian kulutuksen olevan Suomessa vuonna 2020 yhteensä 327 TWh. Tästä uusiutuvista energialähteistä saadun energian määrä tulee olla 124 TWh, jotta Suomi täyttäisi velvoitteensa nostaa uusiutuvan energian osuus 38 prosenttiin energian kulutuksesta vuonna 2020. Ministerityöryhmän mukaan uusiutuvan energian haastavaan lisäystavoitteeseen päästään edistämällä erityisesti metsähakkeen ja muun puuenergian käyttöä, tuulivoimaa, liikenteen biopolttoaineiden käyttöä sekä lisäämällä lämpöpumppujen käyttöä.

Vuonna 2009 metsähakkeen käyttö oli noin 10 TWh eli noin 5 miljoonaa kuutiometriä. Ministerityöryhmän esityksen mukaan tavoitteena on nostaa metsähakkeen käyttö 25 TWh:iin eli noin 13,5 miljoonaan kuutiometriin vuoteen 2020 mennessä. Metsähakkeen käyttöä pyritään edistämään tukipaketilla, joka sisältää pienpuun haketuksen energiatuen, muuttuvan sähköntuotannon käyttöön liittyvän tuen ja pien-CHP:n syöttötariffin takuuhintajärjestelmän uusille laitoksille.

Ilmasto- ja energiapoliittisen työryhmän tavoitteena on myös liikenteen biopolttoaineiden käytön nostaminen 7 TWh:iin vuoteen 2020 mennessä. Tavoite pyritään saavuttamaan nostamalla biopolttoaineiden sekoitusosuus 20 %:iin liikennepolttoaineiden myyjille asetettavan jakelovelvoitteen avulla. Tämä edellyttää huomattavia investointeja biodieseltuotantoon. Suomeen kaavaillaan kolmea ns. toisen sukupolven biodiesellaitosta. Tavoitteen saavuttamiseksi esillä on ollut useita eri puolella maata sijaitsevia hankkeita.

Metsäenergian kuljetusmatkat metsästä käyttöpaikoille ovat yleensä alle 100 kilometrin pituisia. Tämän vuoksi kuljetukset ovat olleet lähes yksinomaan tiekuljetuksia ja metsäenergiaraaka-aineet on haketettu kuljetuksen lähtöpäässä. Metsästä hankittavan energiapuun huomattava lisääminen tulee laajentamaan raaka-aineiden hankinta-alueita ja pidentämään kuljetusmatkoja. Kustannustehokas metsäenergian hankinta tarkoittaa tällöin myös muiden kuljetusmuotojen hyödyntämistä. Tämä edellyttää mm. tie- ja rautatiekuljetusten solmukohtina toimivan terminaaliverkon kehittämistä. Terminaaleina voidaan periaatteessa käyttää myös raakapuun kuormauspaikkoja, joissa voitaisiin myös hakettaa ja välivarastoida energiapuuta. Ongelmaksi voi kuitenkin muodostua metsähakkeen suuri tilantarve, minkä vuoksi hakkeen ja raakapuun käsittely ei välttämättä onnistu useimmilla raakapuun kuormauspaikoilla.

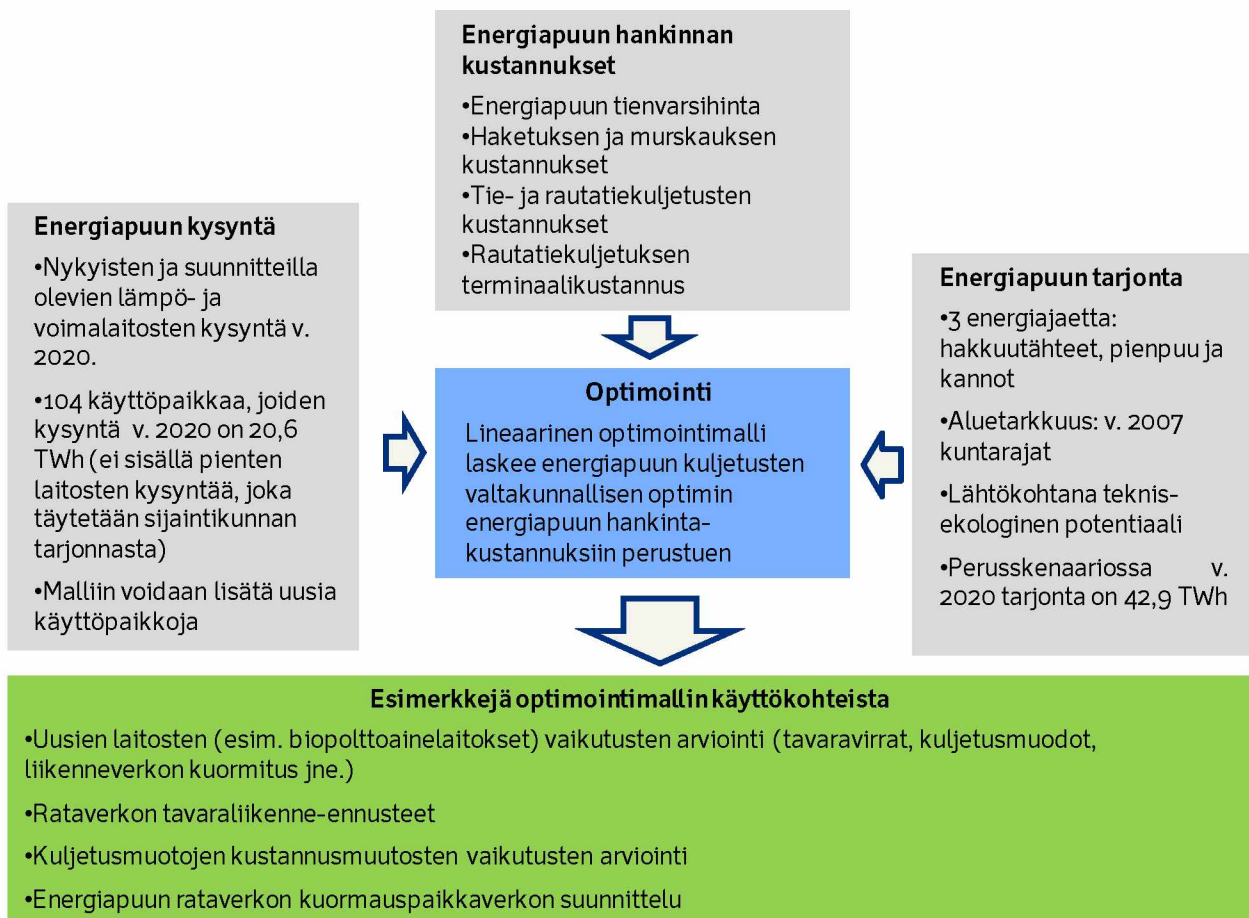
Metsähakkeen käsittelyyn soveltuvien rautatie- ja vesitietermiinalien optimaalinen sijainti on riippuvainen metsäenergian nykyisistä käyttöpaikoista ja erityisesti siitä, mihin uusia metsäenergiaa käyttäviä voima- ja biodiesellaitoksia toteutetaan. Metsäenergian kuljetusten suunnat ja pituudet voivat poiketa merkittävästi raakapuun päävirtojen suunnista. Tämän vuoksi energiapuun kuljetuksissa käytettävien terminaalien optimaaliset paikat eivät välttämättä ole samoja kuin raakapuun kuljetuksissa käytettävien terminaalien paikat.

Metsäenergian kuljetuksia koskevien muutosten ennakointi on tärkeää kuljetuksiin käytettävien väylien ylläpidon ja terminaalien suunnittelussa. Rautateitse ja vesitse hoidettavien tavaravirtojen määrittäminen on tärkeä terminaaliverkon suunnittelun lähtökohta. Metsäenergian alueellisesti muuttuvan tarjonnan ja kysynnän vaikutuksia energiapuun kuljetusvirtoihin voidaan parhaiten arvioida optimointiin perustuvan mallintamisen avulla. Tällainen optimointimalli voi perustua esimerkiksi puun myyjän voiton maksimointiin tai energiapuun käsittely- ja kuljetusketjun kustannusten minimointiin valtakunnallisella tasolla.

## 2 Optimointimallin kuvaus

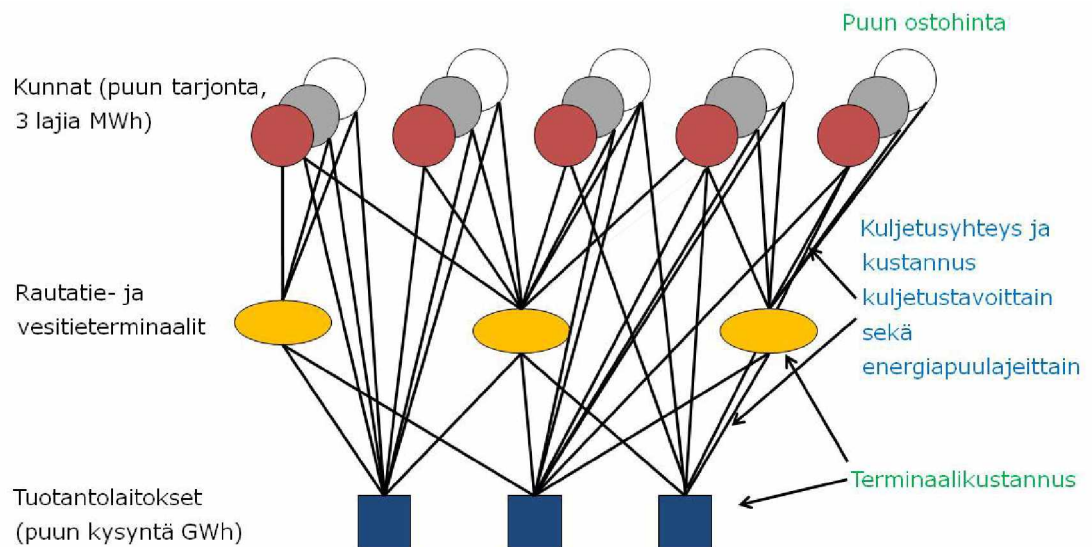
Lähtökohtana energiapuun kuljetusten optimointimallin suunnittelussa oli Liikenneviraston laatima raakapuuvirtojen valtakunnallinen optimointimalli (Pekka Iikkanen et al., 2010). Molemmat mallit perustuvat lineaarisen optimointimallin käyttöön. Energiapuun mallin lähtötiedot muodostuvat metsäenergian tarjonta- ja käyttötiedoista, kuljetusverkkojen (väylät ja terminaalit) kuvauksista sekä metsähakkeen hinta-, käsittely- ja kuljetuskustannuksista. Mallissa voidaan tarkastella samanaikaisesti kaikkia kuljetusmuotoja. Toistaiseksi malli sisältää vain tiekuljetusten ja rautatiekuljetusten käsittelyn edellyttämät kuljetusverkot. Myöhemmin mallia voidaan täydentää sisävesi- ja rannikkokuljetusten tarkastelun edellyttämällä lähtötiedoilla.

Energiapuun valtakunnallinen optimointimalli laskee metsäenergian tarjontapisteiden ja metsäenergian käyttöpisteiden väliset tavaravirrat metsäenergian hankintakustannuksiin perustuen. Optimointimallissa metsäenergia on jaettu kolmeen energiapuulajiin, jotka ovat hakkuutähteet, pienpuu ja kannot. Malli optimoi samanaikaisesti kaikkien energiapuulajien tavaravirrat niin, että kaikkien metsäenergian käyttöpaikkojen energiatarve tulee tyydytettyä niin, että metsäenergian hankinnan kustannukset muodostuvat valtakunnan tasolla mahdollisimman pieniksi (kuva 1).



Kuva 1. Energiapuukuljetusten optimointimallin rakenne ja käyttökohteet.

Optimointimallin elementit muodostuvat puun tarjontapisteistä (kunnat), puun käyttöpaikoista, terminaaleista sekä näiden välisistä yhteyksistä (kuva 2). Käytävissä olevia reittejä ovat erilaiset elementtien välisten yhteyksien kombinaatiot eli suorat tiekuljetukset ja tie–rautatiekuljetukset rautatieterminaalien kautta (malliin voidaan lisätä myös tie–vesitiekuljetuksista muodostuvat reitit erikseen määritettävien vesiliikenneterminaalien kautta). Rautatiekuljetuksen käytön edellytyksenä on, että käyttöpaikka voi vastaanottaa rautateitse toimitettavaa metsähaketta.



Kuva 2. Energiapuun optimointimallin elementit.

## 3 Lähtötiedot

### 3.1 Energiapuun tarjonta ja kysyntä

Optimointimallissa tarkastellaan pelkästään kotimaisen metsäenergian tarjontaa ja kysyntää. Kotimaisen metsäenergian tarjonta määritetään optimointeja varten kunnittain. Tarjonnassa eritellään erilaiset energiapuulajit (hakkuutähteet, pienpuu ja kannot) niiden toisistaan poikkeavien kuljetus- ja terminaalikustannusten vuoksi. Mallissa käytetään vuoden 2007 kuntarajoja.

Energiapuun kysyntä määritetään käyttöpaikoittain energiamäärinä, esimerkiksi megawattitunteina (MWh). Käyttöpaikkoja ovat mm. kattila- ja voimalaitokset, pelletti-tehtaat ja mahdolliset biopolttoainelaitokset. Käyttöpaikkakohtaisen metsäenergian kysynnän määrittämisessä otetaan huomioon muiden energialähteiden kuten mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteena saatavan hakkeen, kivihiilen, maakaasun ja turpeen osuudet laitosten kokonaisenergian tarpeista. Lisäksi metsäenergian kokonaiskysynnästä vähennetään mahdollisen metsäenergian tuonnin osuus. Optimointia varten samalla paikkakunnalla toimivien käyttöpaikkojen energiatarve voidaan yhdistää.

### 3.2 Kuljetus- ja terminaalikustannukset

Energiapuulajeille määritettiin kunnittain keskimääräiset tienvarsihinnat energiapuulajeittain. Ne sisältävät metsänomistajille maksettavat kantohinnat ja energiapuun korjuun kustannukset. Kustannukset laskettiin leimikoiden korjuuteknisten ominaisuuksien mukaan. Pienpuun hinnassa otettiin huomioon tuki 4,00 €/MWh.

Metsäenergiajakeiden tienvarsihinnat vaihtelivat kunnittain seuraavasti:

- |                            |                   |
|----------------------------|-------------------|
| • hakkuutähteet            | 3,81 – 6,22 €/MWh |
| • kannot                   | 4,37 – 8,14 €/MWh |
| • pienpuu, perusvaihtoehto | 7,28 – 8,90 €/MWh |
| • pienpuu, 2-vaihtoehto    | 8,04 – 9,73 €/MWh |

Varsinaisen kuljetuksen kustannukset määritettiin kaukokuljetusmatkasta riippuviksi funktioiksi. Optimointimalliin sisältyvät toimitusketjut ovat:

1. Hakkuutähteet
  - haketus tienvarsivarastolla + hakkeen kuormaus ja kuljetus autolla käyttöpaikalle
  - hakkuutähteiden kuormaus ja kuljetus autolla rautatieterminaaliin + haketus terminaalissa + hakkeen kuormaus ja kuljetus junalla
2. Kannot
  - kantopuun kuormaus ja kuljetus autolla käyttöpaikalle + murskaus käyttöpaikalla
  - kantopuun kuormaus ja kuljetus autolla lastaustermiinaliin + murskaus + murskeen kuormaus ja kuljetus junalla

### 3. Pienpuu

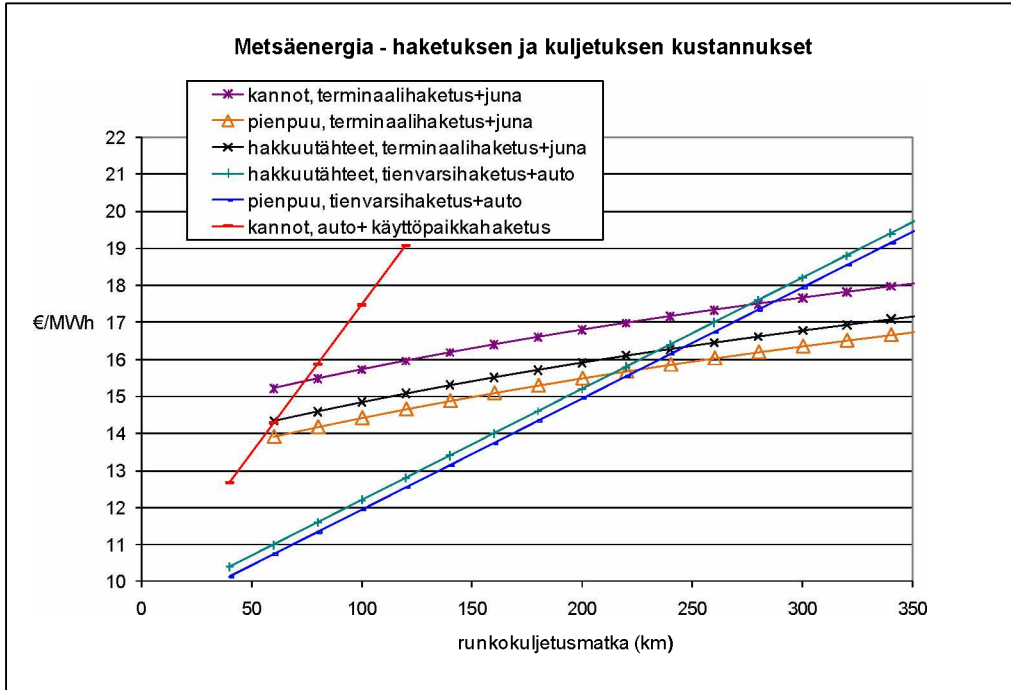
- pienpuun haketus tienvarsi- ja hakkeen kuormaus ja kuljetus autolla
- pienpuun kuormaus ja kuljetus autolla rautatieterminaliin + haketus + hakkeen kuormaus ja kuljetus junalla

Haketuksen ja terminaalitoimintojen kustannuksina sekä yleiskustannuksina (1,50 €/MWh) on mallissa käytetty energiapuulajeittain:

- hakkuutähteet: haketus tienvarressa 5,50 €/MWh ja haketus terminalissa 4,95 €/MWh
- kannot: murskaus käyttöpaikalla 5,70 €/MWh ja murskaus terminalissa 6,05 €/MWh
- pienpuu: haketus tienvarressa 5,30 €/MWh ja haketus terminalissa 4,65 €/MWh

Kuljetuskustannukset määritettiin autokuljetukselle energiapuulajeittain. Junalla kuljetetaan vain hakettua tai murskattua materiaalia, minkä vuoksi kaikille energiapuulajeille käytettiin samaa rautatiekuljetuksen kustannusfunktiota. Rautatiekuljetuksen terminaalikustannukset asetettiin vastaamaan tilannetta, jossa lastaus ja purkaminen tehdään tehokkaasti. Lastauksen osalta se tarkoittaa terminaalikäsitteilyä, jossa hake tai murske välivarastoidaan lastausraiteen välittömässä läheisyydessä ja junavaunut täytetään tehokkaalla kuormaajalla tai materiaalikäsitteilykoneella. Tuotantolaitosten oletetaan olevan suunniteltu junakuormien vastaanottoon. Tällä hetkellä kaikki optimointilaskennassa junakuljetukseen osoitetut vastaanottopaikat eivät täytä tätä kriteeriä, mutta purkupaikkojen oletetaan kehittyvän kuljetusten volyymin kasvun myötä.

Kuvassa 3 esitetään energiapuun haketus- ja kuljetusketjujen kustannukset kuljetusmatkan suhteen. Nämä käsitteilykustannukset sisältävät myös hankinnan yleiskustannukset.



Kuva 3. Energiapuun käsittely- ja kuljetusketjujen kustannukset runkokuljetusmatkan suhteen.

Hakettamattoman kantopuun kuljetus on huomattavasti hakkuutähteiden ja pienpuun kuljetusta kalliimpaa. Se on kuitenkin merkittävä energiapuulähde ja sen hankinta ja käsittelytekniikka vielä uutta. Parhailtaan kehitetään ns. esimurskausta, minkä ansiosta kuormien tiiviyyttä saadaan paremmaksi ja kuormakoko siten kasvaa. Tässä tarkastelussa esimurskausvaihtoehto ei ollut mukana. Todennäköisesti kantopuu jää esimurskauksen käsittävällä tuotantoketjullakin selvästi kalliimmaksi kuin muut energiapuulajit.

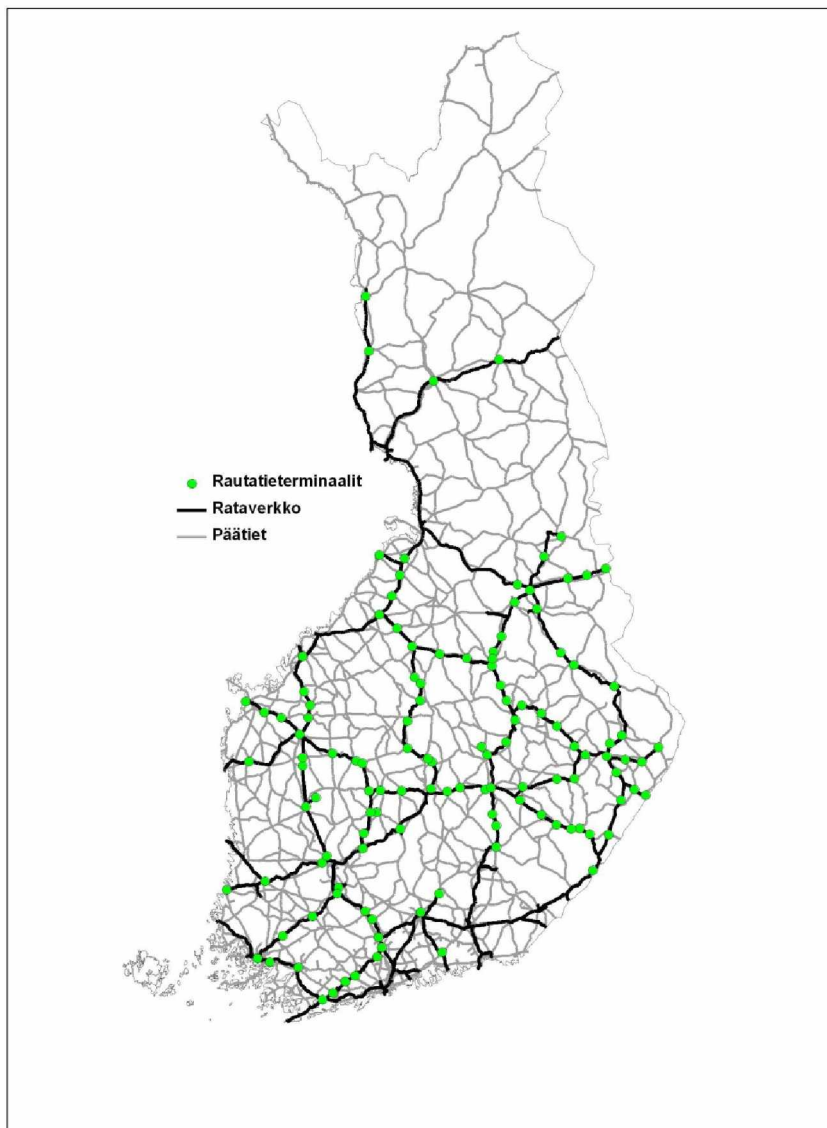


## 4 Kuljetusjärjestelmän kuvaus

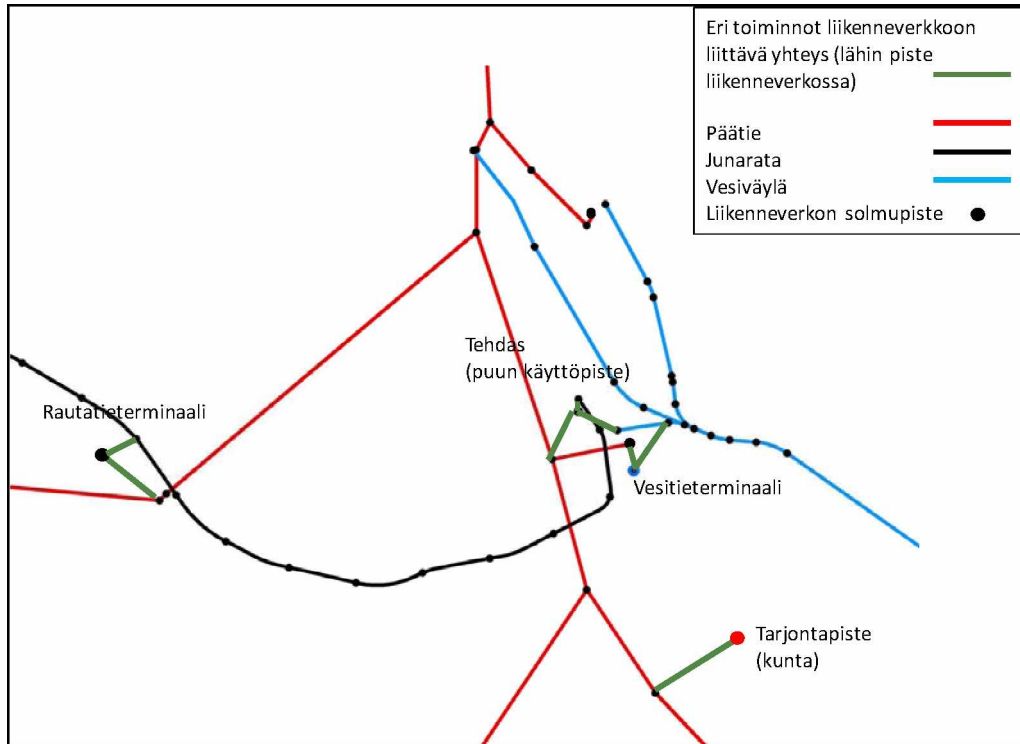
### 4.1 Kuljetusjärjestelmän osat

Kuljetusjärjestelmän runko koostuu päätieverkosta, Suomen rataverkosta ja rautatiekuljetuksissa käytettävistä terminaaleista (kuva 4). Lisäksi kuljetusjärjestelmään sisältyy yhteydet kotimaisen puun tarjontapisteistä päätieverkkoon, yhteydet päätieverkolta rautatie- ja vesititerminaaleihin sekä yhteydet päatie- ja rataverkolta energiapuun käyttöpaikoille (kuva 5). Tuotantolaitosten mahdollisuudet vastaanottaa rautatiekuljetuksia määritettiin tapauskohtaisesti. Tiekuljetuksen käyttö on aina mahdollinen.

Mallissa kuvattuja energiapuun rautatieterminaaleja ovat vuonna 2009 käytössä olleet raakapuun kuormauspaikat ja terminaalit (noin 125 kpl). Terminaalien määrää ja sijaintia voidaan helposti muuttaa toisenlaiseksi.



Kuva 4. Mallissa kuvattu päätieverkko ja rataverkko sekä rautatieterminaalit.



Kuva 5. Esimerkki energiapuun tarjontapisteiden, rautatieterminaalien ja energiapuun käyttöpaikkojen kiinnittämisestä liikenneverkkoon.

## 4.2 Kuljetusten reititys ja kuljetusjärjestelmän rajoitukset

Tiekuljetusten kustannuslaskennan lähtökohtana olevat kuljetusmatkat määritetään nopeimpaan reittiin perustuen. Rautatiekuljetusten osalta kuljetuskustannukset määritetään lyhimpään ratayhteyteen perustuen. Optimointimallia sovellettaessa rautatiekuljetusten kuljetuskustannukset voidaan määrittää myös vaihtoehdoisen reitin mukaan. Tällöin voidaan ottaa huomioon myös muita kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä kuten ratojen nopeusrajoitukset ja sähköistys.

Kapasiteettirajoitusten tarkastelu on osa optimointitulosten analysointia. Esimerkiksi vertailemalla optimointitulosten mukaisia kuljetusvirtoja kuljetusjärjestelmän eri osien ominaisuuksiin (esim. rataosan välityskykyyn), saadaan selville kuljetusjärjestelmän pullonkauloja ja kehittämistarpeita. Tämän vuoksi lähtökohdaksi on otettu tilanne, jossa tie- ja rataverkon sekä terminaalien kapasiteettirajoituksia ei oteta huomioon.

## 5 Optimointimallin käyttö

### 5.1 Skenaarioiden muodostaminen

Optimointimallin käyttämiseksi määritetään tarkasteltavan tilanteen (skenaarion) mukainen energiapuun kysyntä ja tarjonta, käytettävät kuljetuskustannukset ja käytettävissä olevat terminaalit. Mikäli halutaan tarkastella pelkästään kysynnän ja tarjonnan muutoksia, voidaan lähtökohtana käyttää edellä kuvattua kuljetusjärjestelmää ja kuljetustapakohtaisia kustannuksia. Mikäli halutaan tarkastella muutoksia myös kuljetusjärjestelmässä ja/tai kuljetuskustannuksissa, on tällaiset muutokset vietävä kuljetusjärjestelmään ja kuljetusyhteyksien kustannukset määritettävä uudelleen. Esimerkiksi rautatieterminaaliverkon supistamisen vaikutustarkastelu voidaan toteuttaa nostamalla ”poistettavien terminaalien ” kustannuksia niin, ettei niitä kannata käyttää.

Energiapuun vuotuinen kysyntä annetaan energiapuun käyttöpaikoittain (samalla paikkakunnalla sijaitsevia tuotantolaitoksia voidaan yhdistää). Mahdollinen tuontien energiapuun vuotuinen käyttö annetaan erikseen, jolloin optimoinnissa tarkastellaan pelkästään kotimaisen energiapuun tavaravirtoja. Kotimaisen energiapuun tarjonta kuvataan kunnittain ja energiapuulajeittain sekä sovitetaan yhteen puun kysynnän kanssa (tarjonnan on oltava vähintään yhtä suuri kuin kysyntä).

### 5.2 Liikenneverkon kuormitukset

Optimointimalli laskee energiapuulajeittain suorat autokuljetuksina hoidettavat puuvirrat sekä rautatieterminaalien kautta kulkevat tavaravirrat vuotuisina energiamäärinä, jotka voidaan muuttaa tonnimääräksi tai irtokuutioksi kuljetus- ja liikennejärjestelmätarkasteluja varten. Energiapuun energiasisältö ja tilavuuspaino on riippuvainen puun kosteuspuhtausasteesta. Keskimääräinen kosteusprosentti on noin 40, jolloin haketetun energiapuun irtotilavuuspaino noin 300 kg/ irtokuutiometri. Tällöin energiapuun keskimääräinen energiasisältö on 0,8 MWh/ irtokuutiometri (1 MW=0,375 tonnia).

Optimointiin perustuvista energiapuuvirroista muodostetaan kuljetusjärjestelmän kuormitusten määrittämistä varten seuraavat kuljetusmatriisit:

- tiekuljetukset puun tarjontapisteiden, tuotantolaitosten ja terminaalien välillä
- rautatiekuljetukset terminaalien ja tuotantolaitosten välillä
- vesitiekuljetukset terminaalien ja tuotantolaitosten välillä

Kuljetusmatriisit sijoitellaan liikenneverkoille EMME -sijoitteluohjelmistolla. Sijoittelujen tuloksena saadaan liikenneverkon osien (linkkien) kuljetusmäärät. EMME-sijoitteluohjelmalla voidaan tuottaa myös monia muita hyödyllisiä tulostuksia. Esimerkiksi ohjelmalla voidaan määrittää tietyn linkin kautta kulkevien kuljetusvirtojen lähtö- ja määräpaikat ns. linkkihaastatteluna.

## 6 Skenaariotarkastelut

### 6.1 Perusskenaario

#### 6.1.1 Metsäenergian tarjonta

Metsäenergian tarjonnan kuntakohtaiset arviot perustuvat vuosina 2008–2010 tehtyihin selvityksiin kiinteiden puupolttoaineiden saatavuudesta ja käytöstä Suomessa vuonna 2020 (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2010). Energiapuun saatavuus on riippuvainen ainespuuhakkuiden määrästä ja leimikoiden rakenteesta. Lähtökohtana pidettiin 56,6 milj. m<sup>3</sup> vuotuista kotimaisen ainespuun hakkuumäärää.

Energiapuun tarjontana on tarkasteltavassa perusskenaariossa käytetty niin sanottua teknis-ekologista potentiaalia, jossa on otettu huomioon seuraavat tekijät:

- ainespuuhakkuiden määrä ja leimikkorakenne
- korjuutekninen talteen saatavuus ja kohdevalinta
- korjuukohteiden valinta ekologisten seikkojen perusteella
- arvio metsänomistajien myyntihalukkuudesta.

Määrytykset tehtiin metsäkeskusalueittain ja johdettiin kuntakohtaisiksi energiapuupotentiaaleiksi.

Energiapuun kokonaistarjonta perusskenaariossa on 42,9 TWh ja se jakautuu energiapuulajeittain seuraavasti:

- hakkuutähteet uudistushakkuista 12,5 TWh
- kantopuu uudistushakkuista 14,7 TWh
- pienpuu nuorista kasvatusmetsistä 15,7 TWh.

#### 6.1.2 Metsäenergian kysyntä

Tarkasteltava energiapuun kysyntä perustui Metsätehon ja Pöyryn selvityksessä määritettyihin nykyisten ja suunniteltujen uusien käyttöpaikkojen metsäenergian käyttöihin vuonna 2020. Vuonna 2010 metsäenergiaa käytettiin lämpövoimalaitoksissa yhteensä 12,5 TWh (Metsäntutkimuslaitos, 2011). Selvityksen mukaan energiapuun käyttö tulee lähes kaksinkertaistumaan vuoteen 2020 mennessä, jolloin ennustettu kysyntä on 21,6 TWh. Tässä ennusteessa ei ole mukana Suomeen kaavailtujen biopolttoainelaitosten energian tarvetta.

Metsäntutkimuslaitoksen ja Työtehoseuran koostamissa vuoden 2009 energiapuun käyttötilastoissa käyttöpaikkojen lukumäärä oli noin 650. Suuri osa laitoksista on pieniä. Niistä noin 540 laitoksen vuotuinen puupolttoaineen käyttö oli alle 10 000 MWh.

Perusskenaarioon sisältyvien käyttöpaikkojen lukumäärän vähentämiseksi pienten lämpölaitosten kysyntä (enintään 20 GWh asti) täytettiin sijaintikunnan energiapuun tarjonnasta. Ensisijaisesti kysyntä täytettiin pienpuulla, koska se sopii hakkuutähdettä paremmin pienille energialaitoksille. Tällä tavoin paikalliseen käyttöön ohjatun metsäenergian määrä oli yhteensä noin 1 TWh. Optimointilaskentaan jäi 104 toimituspaikkaa, joiden energiapuun kysyntä oli yhteensä noin 20,6 TWh.

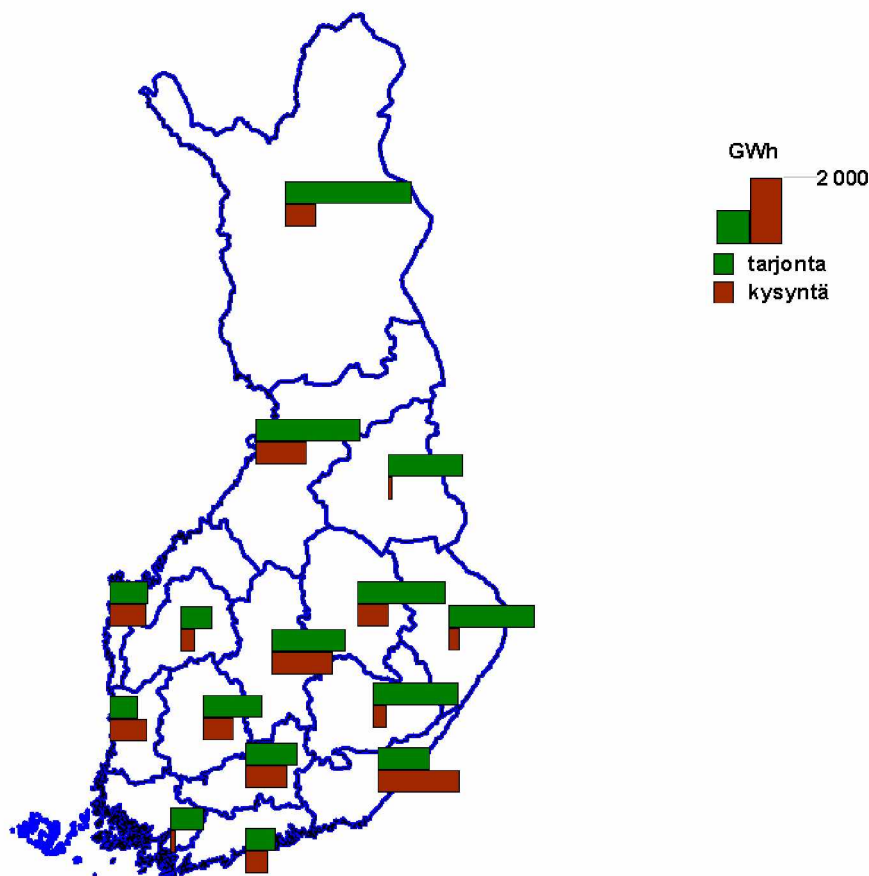
### 6.1.3 Tarjonnan ja kysynnän välinen alueellinen tasapaino

Metsäenergian tarjonta vuonna 2020 on perusskenaariossa noin kaksinkertainen kysyntään nähden. Erityisen selvästi metsäenergian tarjonta ylittää ennustetun peruskysynnän Lapissa, Pohjois-Pohjanmaalla, Kainuussa, Pohjois-Savossa, Pohjois-Karjalassa, Etelä-Savossa ja Pirkanmaalla. Vastaavasti ennustettu kysyntä on selvästi tarjontaa suurempaa Kaakkois-Suomessa. Muualla ennustettu tarjonta ja kysyntä ovat lähes samalla tasolla (kuva 6).

#### Tarjonnan ja kysynnän epävarmuustekijät

Perusskenaariota suuremman tarjonnan mahdollistaa nuorten metsien merkittävä pienpuun reservi. Hyödynnettävän pienpuun tasoa voidaan selvitysten mukaan nostaa vaarantamatta silti kuitupuuta käyttävien tehtaiden puuhoiltoa. Uusi energiapuun tukijärjestelmä (pienpuun energiaturki) parantaneekin pienpuun käyttöön saantia. Selvitysten mukaan pienpuun energiakertymä voi nousta 25 TWh:iin eli 9,3 TWh perusskenaarion tarjontaa suuremmaksi.

Energiapuun kysyntä kasvaa merkittävästi, jos yksi tai useampi esillä olleista biopolttoainelaitoshankkeista päätetään toteuttaa. Tyypillisen laitoksen synnyttämä energiapuun tarve on noin 4,2 TWh.



Kuva 6. Perusskenaarion mukainen energiapuun kysyntä ja tarjonta ELY-keskusalueittain vuonna 2020.

#### 6.1.4 Optimointien tulokset

##### Kuljetustapajakauma sekä kuljetus- ja terminaalikustannukset

Perusskenaariossa kotimaisen metsäenergian kuljetuksia on kysynnän mukaisesti noin 7 milj. tonnia (20,6 TWh). Optimointien mukaisista kuljetuksista suoria tiekuljetuksia on noin 5,7 milj. tonnia (16,9 TWh) ja auto-junakuljetuksia noin 1,3 milj. tonnia (3,7 TWh). Tonnikilometreissä lasketuista kuljetuksista 62 % on tiekuljetuksia ja 38 % rautatiekuljetuksia.

Kuljetukset jakautuvat energiapuulajeittain seuraavasti:

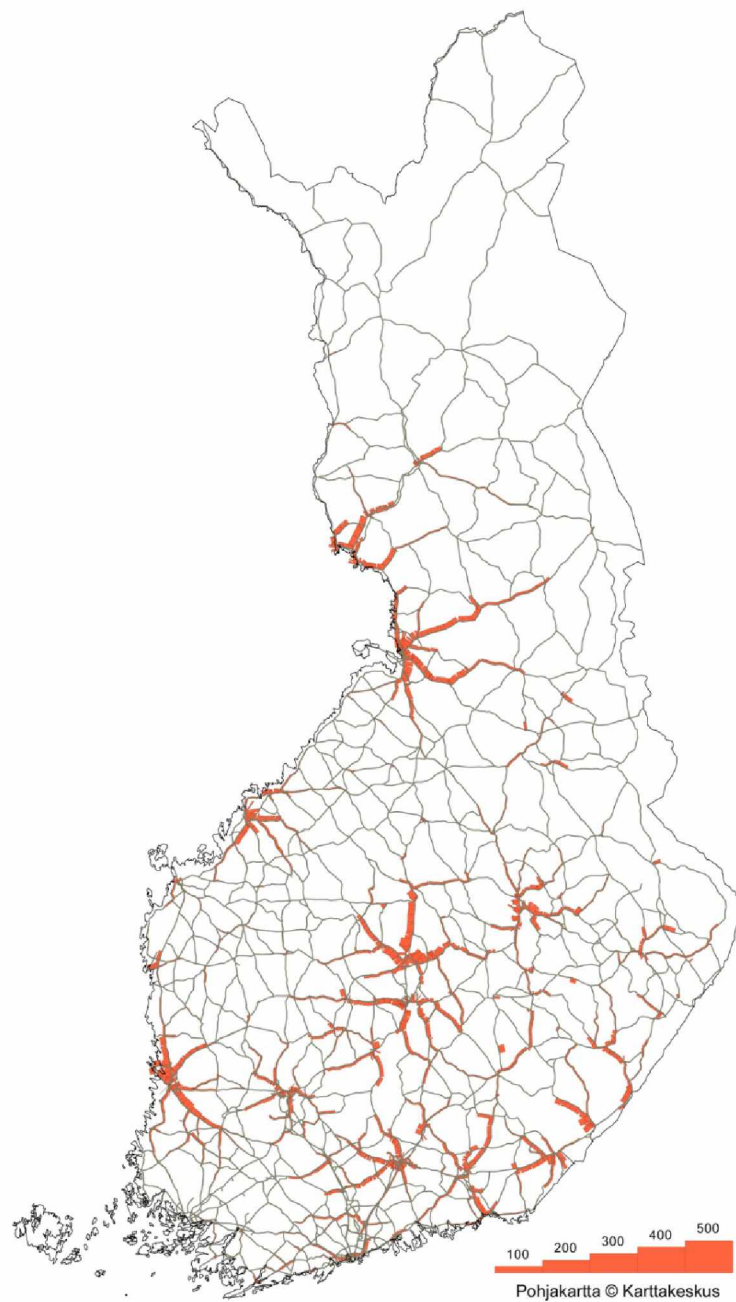
- metsähake                    11,3 TWh
- pienepuu                    6,2 TWh
- kannot                        3,1 TWh

Perusskenaarion optimitilanteessa kotimaisen metsäenergian kuljetus- ja terminaalikustannukset ovat yhteensä noin 231 M€ vuodessa, josta suorien tiekuljetusten osuus on noin 182 M€ ja auto-junakuljetusten osuus noin 50 M€.

##### Kuljetusmatkat ja liikenne- ja terminaaliverkon kuormitukset

Optimointien mukaan kaikkien tiekuljetusten keskimääräinen kuljetusmatka on noin 39 kilometriä ja rautatiekuljetusten noin 133 km. Edellä mainituista tiekuljetusmatkoista puuttuvat kuljetusosuudet yksityisellä ja alemmalla yleisellä tieverkolla.

Energiapuun kuljetukset tieverkolla keskittyvät suurille kysyntäpaikoille johtaville pääteille sekä merkittävimille rautatieterminaaleihin johtaville teille (kuva 7). Optimointien mukaan rautatiekuljetuksia käytetään kaikkein suurimpien käyttöpaikkojen kuljetuksissa. Tällaisia käyttöpaikkoja on perusskenaarion kysynnän mukaan erityisesti Kaakkois-Suomessa, Keski-Suomessa ja Pohjois-Pohjanmaalla (kuva 8).



Kuva 7. Energiapuun kuljetusten aiheuttama päätieverkon kuormitus perusskenaarion mukaisessa valtakunnallisessa optimitilanteessa (1000 tonnia /vuosi). Tarkastelu ei sisällä mahdollisten biopolttoainelaitosten kuljetuksia.



Kuva 8. Energiapuun kuljetusten aiheuttama rataverkon kuormitus (1000 netto-tonnia/vuosi) perusskenaarion mukaisessa valtakunnallisessa optimi-tilanteessa. Tarkastelu ei sisällä mahdollisten biopolttoainelaitosten kuljetuksia.



## 6.2 Case: Äänekosken biopolttoainelaitoshanke

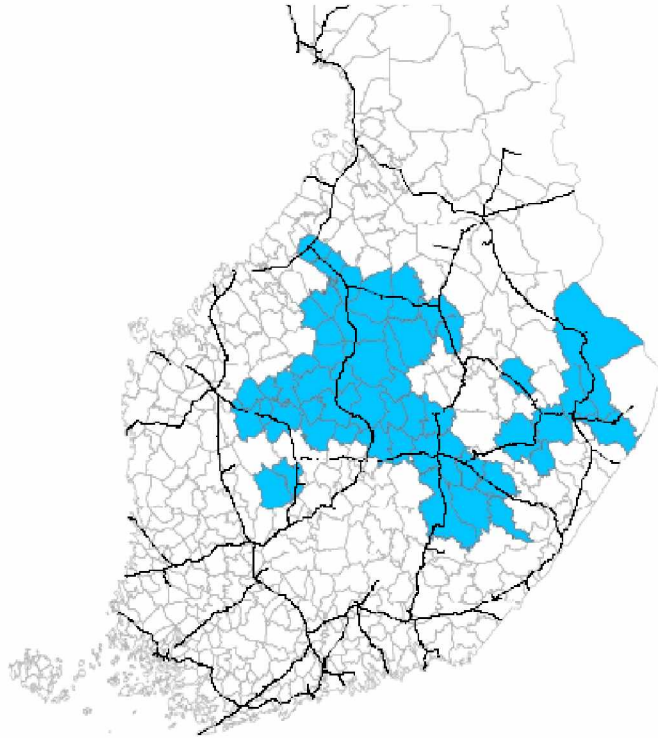
### 6.2.1 Tarkastelun sisältö

Metsäliitto ja Vapo selvittävät biodiesellaitoksen rakentamista joko Kemiin tai Äänekoskelle. Biopolttoainelaitoksissa on tarkoitus käyttää raaka-aineena erilaisia biomassoja kuten hakkuutähteitä, puuta ja turvetta. YVA-selostuksen mukaan laitoksen teho on 500 MW ja täydellä teholla se käyttää vuosittain 4,2 TWh biomassaa. Lähtökohtana tarkastelussa oli, että, laitoksen tarvitsema biomassaa tyydytetään kokonaan kotimaisella metsäenergialla. Tämä tarkoittaa noin 1,4 milj. tonnin kuljetuksia vuodessa. Muutoin energiapuun kysyntä oli edellä tarkastellun perusskenaarion mukainen, toisin sanoen tarkastelussa ollut energiapuun kokonaiskysyntä oli 25,8 TWh.

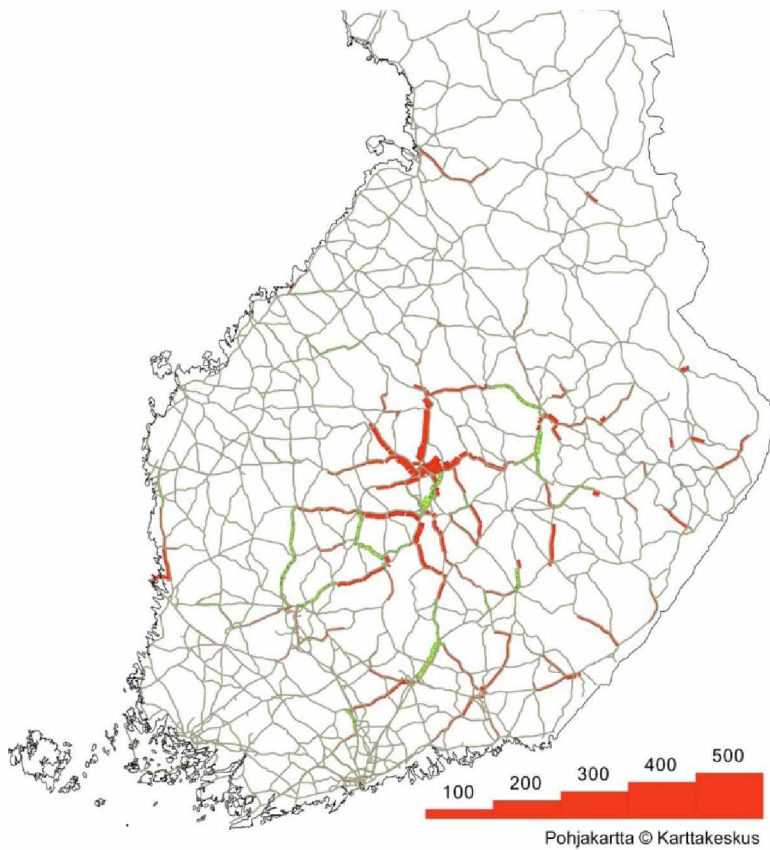
### 6.2.2 Hankkeen vaikutukset

Äänekosken laitoksen energiapuun kuljetuksista tiekuljetuksia on noin 0,4 milj. tonnia ja rautatiekuljetuksia noin 1,0 milj. tonnia. Optimointien mukaan Äänekosken laitoksen energiapuun hankinta-alue kattaa Keski-Suomen, osan Etelä- ja Pohjois-Savoa sekä Pohjois-Karjalaa. Rataverkolla on hankinta-alueen muotoutumisessa keskeinen asema (kuva 9).

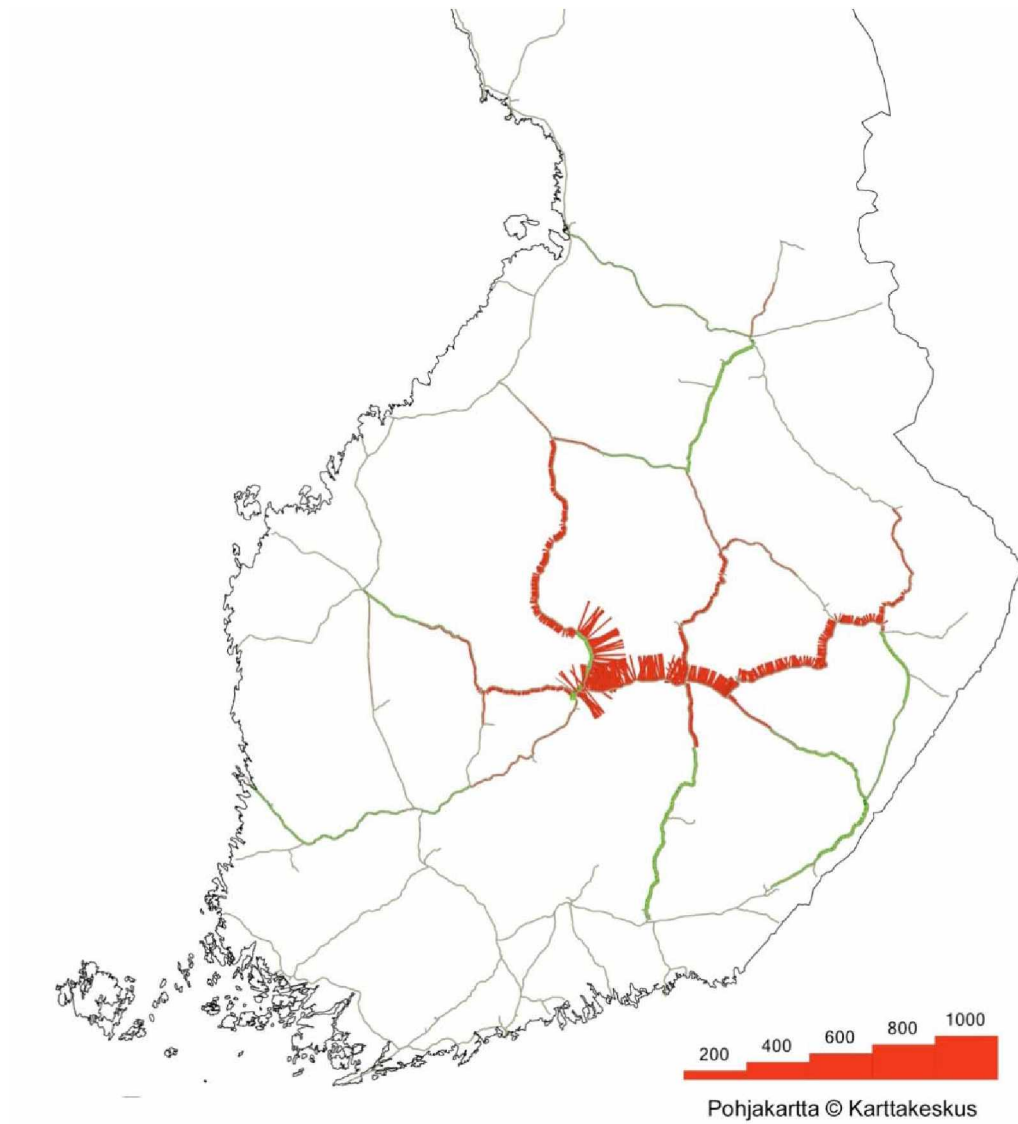
Laitosinvestointi vaikuttaa myös muiden energiapuuvirtojen suuntautumiseen ja niissä käytettäviin kuljetustapoihin. Valtakunnan tasolla suorien tiekuljetusten määrä kasvaa hieman yli 0,7 milj. tonnilla ja rautatiekuljetusten vajaalla 0,7 milj. tonnilla. Samalla kaikkien suorien tiekuljetusten keskimatka kasvaa 40 kilometriin ja rautatiekuljetuksen 164 kilometriin. Vaikutukset tie- ja rataverkon kuormituksissa on esitetty kuvissa 10–11.



Kuva 9. Äänekoskelle suunnitellun biopolttoainelaitoksen energiapuun hankinta-alue. Laitoksen suunniteltu energiatarve on 4,2 TWh ja tarkasteltu koko maan kysyntä 25,8 TWh.



Kuva 10. Energiapuun kuljetusmäärien muutokset perusskenaarioon nähden päätietyverkolla vuonna 2020 (1000 t/vuosi), jos Äänekosken biopolttoainelaitos toteutetaan. Vihreä väri osoittaa liikenteen vähenemistä ja punainen väri liikenteen lisääntymistä.



Kuva 11. Energiapuun kuljetusmäärien muutokset perusskenaarioon nähden rataverkolla vuonna 2020 (1000 t/vuosi), jos Äänekosken biopolttoainelaitos toteutetaan. Vihreä väri osoittaa liikenteen vähenemistä ja punainen väri liikenteen lisääntymistä.

## 7 Mallin soveltamismahdollisuuksia

Optimointimallilla voidaan helposti tarkastella esimerkiksi energiapuun kysynnän ja tarjonnan sekä kuljetuskustannusten muutosten vaikutuksia energiapuun tavaravirtoihin, kuljetustapojen käyttösuuksiin, liikennejärjestelmän kuormitukseen ja kuljetusten kokonaiskustannuksiin. Mallilla voidaan arvioida myös optimaalisen terminaaliverkon laajuutta ja optimaalista terminaalien sijaintipaikkoja. Mallin merkittävin hyöty on päätöksenteon taustalla olevien laskelmien luotettavuuden parantuminen, sillä energiapuukuljetusvirtoihin vaikuttavien eri tekijöiden hallinta ilman mallintamista on hyvin vaikeaa.

Optimointimallia voidaan soveltaa monentyyppisissä liikennejärjestelmän suunnittelutehtävissä, jollaisia ovat mm.:

- Selvitykset, joissa tarkastellaan erilaisten energiapuun tarjonta- ja kysyntäkenaarioiden vaikutuksia energiapuuvirtoihin, kuljetustapojen työnjakoon ja liikenneverkon kuormitukseen. Tällaiset tarkastelut voivat koskea esimerkiksi energiapuun tarjonnan kasvua luvussa 6.1.3 mainitun pienpuureservin käyttöönottoa tai yksittäistä laitoshanketta kuten luvussa 6.2 on tehty Äänekosken biopolttolaitoshankkeen osalta.
- Energiapuun terminaaliverkon kehittämistä koskevat selvitykset, joissa tutkitaan määrältään ja sijainniltaan erilaisia terminaaliverkkovaihtoehtoja. Vaihtoehtojen vertailuja varten mallin avulla lasketaan energiapuukuljetusten kokonaiskustannukset, terminaaleissa kuormattavat puumäärät sekä suoritteet eri liikennemuodoilla. Mallin avulla tehtyjä laskelmia terminaalien kautta kulkevista puumääristä voidaan hyödyntää myös terminaalien yksityiskohtaisemmassa suunnittelussa kuten rautatieterminaalin kuormausraiteiden pituuksien ja varastoalueiden laajuuden mitoituksessa.
- Vähäliikenteisten ratojen ylläpidon kannattavuuden arviointia koskevat selvitykset, joissa vertaillaan radan peruskorjauksen kannattavuutta vaihtoehtoon, jossa radan liikenne lakkautetaan. Mallin avulla voidaan laskea liikennejärjestelmätason vaikutuksia kuljetuskustannuksiin ja tie- ja rataverkon suoritteisiin, joita voidaan hyödyntää arvioitaessa toimenpiteiden vaikutuksia liikenneverkon ylläpitokustannuksiin ja liikenteen ulkoisiin kustannuksiin.

Optimointimallia voidaan hyödyntää myös operatiivisen toiminnan suunnittelussa kuten esimerkiksi seuraavissa tehtävissä:

- Mallin avulla voidaan arvioida esimerkiksi erilaisten kuljetusten organisointimallien vaikutuksia kuljetuskaluston kiertonopeuteen ja tarvittavaan kaluston määrään. Esimerkiksi rautatiekuljetusten osalta voidaan kuljetusvirtojen suuruuteen perustuen arvioida kustannustehokkaiden suorien asiakasjunien käyttömahdollisuutta ja saavutettavia hyötyjä liikennöitäessä terminaalien ja tuotantolaitosten välillä.
- Mallia voidaan hyödyntää yrityskohtaisessa kuljetusjärjestelmän suunnittelussa arvioimalla energiapuun hankinta-alueita ja edullisimpia kuljetusketjuja yksittäisen laitoksen metsäergipuun hankinnassa.

Optimointimallia voidaan kehittää edelleen erilaisia ja yksityiskohtaisempia käyttötarkoituksia varten. Esimerkiksi tarjonnan alueellista tarkkuutta lisäämällä ja sisällyttämällä myös alempiasteinen tieverkko kuljetusjärjestelmään, voidaan tehdä yksityiskohtaisempia tarkasteluja erityisesti tieverkon ylläpitoon ja tiekuljetusten suunnitteluun liittyen. Myös vesikuljetusmahdollisuuden sisällyttäminen malliin on helppoa.

## Kirjallisuusluettelo

Pekka Iikkanen, Sirkka Keskinen, Antti Korpilahti, Tapio Räsänen, Ari Sirkiä, Raaka-puuvirtojen valtakunnallinen optimointimalli., Mallin kuvaus ja skenaariotarkastelut. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 29/2010.

Metsäntutkimuslaitos. Puun energiakäyttö 2010, Metsätilastotiedote 16/2011, 3.5.2011.

Työ- ja elinkeinoministeriö. Kiinteiden puupolttoaineiden saatavuus ja käyttö Suomessa vuonna 2020. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 66/2010.



