

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Metsätalouden koulutusohjelma

Tatu Santamäki

Voimajohtoaukeiden metsätaloudellinen hyödyntäminen

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2017



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Huhtikuu 2017**  
**Metsätalouden koulutusohjelma**

Karjalankatu 3  
80200 Joensuu  
(013) 260 6900

**Tekijä**  
Tatu Santamäki

**Nimeke**  
Voimajohtoaukeiden metsätaloudellinen hyödyntäminen

**Tiivistelmä**

Uuden kansallisen energia- ja ilmastostrategian mukaan metsähakkeen määrän tulisi nousta nykyisestä 8 miljoonasta hakekuutiosta 14,5 miljoonaan hakekuutioon. Tämä tarkoittaa 6,5 miljoonan hakekuutioon lisäystä vuoteen 2030 mennessä. Voimajohtoaukeat kattavat metsäpinta-alasta Suomessa yhteensä 52 000 hehtaaria ja vierimetsäalueet mukaan luettuna jopa 200 000 hehtaaria. Voimajohtoaukeiden tarjoamaa metsäpinta-alaa voitaisiin mahdollisesti hyödyntää, mikäli tulisi tarve lisätä energialeimikoiden määrää, jotta energia- ja ilmastostrategian tavoitteeseen päästään.

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia, voitaisiinko voimajohtoaukeita hyödyntää kasvattamalla näille aukeille taimikkoa tai metsikköä siten, että toiminta olisi myös kannattavaa. Opinnäytetyössä käytettiin metsikkösimulaatioihin MOTTI-ohjelmistoa, josta voitiin poimia tarkasteltavia tunnuslukuja. Toiminnan kannattavuutta tarkasteltiin nettotulojen nykyarvon perusteella. Työssä käytettiin kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. Osa aineistosta kerättiin metsäkeskukselta, osa saatiin MOTTI-ohjelmistosta ja osa itse tutkimalla.

Tulosten perusteella voidaan todeta, ettei ainakaan tässä opinnäytetyössä esiteltyin metsänkasvatus- ja korjuukeinoin voida voimajohtoaukeilla toimia kannattavasti. Kannattavuuteen vaikuttaa suuresti runkojen pieni koko, eikä toimintaa varten saada minkäänlaista rahallista tukea. Jatkotutkimuksena voitaisiin myös selvittää konekustannuslaskennan avulla, olisiko toiminnalle mahdollista saada taloudellinen kannattavuus. Yhtenä jatkotutkimusaiheena voisi olla potentiaalikartta, josta selkeytyisi hyödyntämiskelpoiset metsäalueet voimajohtoaukeilla.

**Kieli**  
suomi

Sivuja 52  
Liitteet 4  
Liitesivumäärä 4

**Asiasanat**

Voimajohtoaukeat, metsätalous, kannattavuus, MOTTI-ohjelma



**THESIS**  
**April 2017**  
**Degree Programme in Forestry**

Karjalankatu 3  
FIN 80200 Joensuu  
FINLAND  
Tel. (013) 260 6900

Author  
Tatu Santamäki

Title  
Forest Utilization of Overhead Powerline Areas

Abstract

According to the new National Energy and Climate Strategy, the usage of wood chips would rise from 8 million cubic meter to 14.5 million cubic meter. High voltage power line areas reserve altogether 52 000 hectares of forestry area in Finland. Reserved forestry area rises to 200 000 hectares if the restricted areas next to power lines are regarded. Forest areas reserved by high voltage power lines could be utilized if there would be an increase of demand for energy forests.

The objective of this research was to explore if high voltage power line areas could be utilized by growing an energy forest into the area in a profitable way. In this thesis MOTTI-simulator was used for forest simulations from which statistics could be taken. Profitability was observed by calculating net present values. Quantitative research method was used in this thesis. Part of the material was obtained from Forest Centre of Finland, from MOTTI-simulator and by manual research.

Based on the results, it can be concluded that at least forestry plantation and harvesting methods used on the high voltage power line areas in this thesis are not able to operate profitably. Profitability was greatly affected by the small size of the trunks and there are no any kind of financial support for this kind of forestry. Further research could investigate profitability with machine cost accounting, whether it would be possible to achieve profitability. Another research could be a potential map, from which utilizable forests areas would be clarified on the high voltage power line areas.

Language  
Finnish

Pages 52  
Appendices 4  
Pages of Appendices 4

Keywords  
Powerline, forestry, MOTTI-simulator, profitability

## Sisältö

1	Johdanto .....	5
2	Voimajohtoaukeat Suomessa .....	5
2.1	Voimajohtoaukeiden omistajuus .....	6
2.2	Biodiversiteetti .....	7
2.3	Työturvallisuus .....	8
2.4	Sähköstaattinen purkaus .....	9
3	Metsätalouden harjoittaminen voimajohtoaukeilla .....	10
3.1	Metsätaloudessa yleisesti käytetyt puulajit .....	11
3.1.1	Mänty .....	12
3.1.2	Kuusi .....	12
3.1.3	Rauduskoivu .....	13
3.1.4	Hieskoivu .....	14
3.2	Taimikonhoito voimajohtoaukeilla .....	14
3.3	Energiapuun korjuun vaikutukset metsiin .....	15
3.4	Metsähake .....	16
3.5	Energiapaju .....	18
3.6	Taloudellinen kannattavuus .....	19
3.6.1	Nettotuottojen nykyarvo .....	19
3.6.2	Metsähake .....	20
3.6.3	Energiapaju .....	23
4	Tutkimusongelma .....	26
5	Aineisto ja menetelmät .....	27
5.1	Aineiston hankinta .....	27
5.2	Taimikoiden simulaatio .....	28
5.3	Määrällinen tutkimus .....	30
6	Tulokset .....	30
6.1	Puuston valtapituus 4 metriä .....	30
6.2	Puuston valtapituus 8 metriä .....	31
6.2.1	Simulaatiotulokset yleisille puulajeille .....	32
6.2.2	Männyn uudistamistapojen vertailu .....	35
6.3	Voimajohtoaukeat Kymenlaakson alueella .....	38
6.4	Simulaatiotulokset suhteutettuna voimajohtoaukeille .....	40
6.4.1	Mänty ja energiapaju .....	40
6.4.2	Mielekkäin puulaji .....	41
6.5	Taloudellinen kannattavuus .....	45
7	Pohdinta .....	46
	Lähteet .....	50

### Liitteet

Liite 1 Laasasenahon tilavuusyhtälöt perustuen rinnankorkeusläpimittaan ja piteeseen

Liite 2 Kymenlaakson maakunnan kasvupaikkajakauma

Liite 3 Taulukko polttoaineiden laatuominaisuuksien vertailuun

Liite 4 Kannattavuuslaskennassa käytettyjä arvoja

## 1 Johdanto

Uusien ja suurten metsäteollisuuden hankkeiden myötä myös kysyntä pienemmälle puutavaralle kasvaa. Voi olla, että tulevaisuudessa syntyy kysyntää puhtaasti bioenergiaa tuottaville metsäpelloille. Tällöin voidaan tosiasiasa mieltää, voitaisiinko juuri voimajohtoaukeiden tarjoamaa metsäpinta-alaa hyödyntää energialeimikkotarpeisiin.

Uuden kansallisen energia- ja ilmastostrategian mukaan metsähakkeen määrä nousisi nykyisestä 16 terawattitunnista, 8 miljoonasta hakekuutiosta, 29 terawattituntiin eli 14,5 miljoonaan hakekuutioon. Tämä tarkoittaisi siis 6,5 miljoonan hakekuution lisäystä vuoteen 2030 mennessä. (MMM 2016.) Opinnäytetyössä tarkasteltiin voimajohtoaukeilla sijaitsevia puustoja näkökulmasta ja perusideasta, jossa puustot hyödynnetään hakettamalla mielekkäimmällä menetelmällä.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin, voidaanko voimajohtoaukeita hyödyntää metsätaloudellisesti. Metsätaloudellinen hyödyntäminen tässä työssä tarkoittaa puustojen uudistamista voimajohtoaukeille ja niiden päätehakkaamista sitten, kun puuston pituus on lähellä varoetäisyyksiä. Tutkimuksessa käytettiin simulaatio-ohjelmistoa puustojen luontiin, joista johdettiin tarkasteltavat tekijät analyysia varten. Tutkimuksen toisessa, taloudellisessa vaiheessa tarkasteltiin nettotuottojen nykyarvoja eri näkökulmista. Nettotuottojen nykyarvot kertoivat, oliko toiminta taloudellisesti kannattavaa.

## 2 Voimajohtoaukeat Suomessa

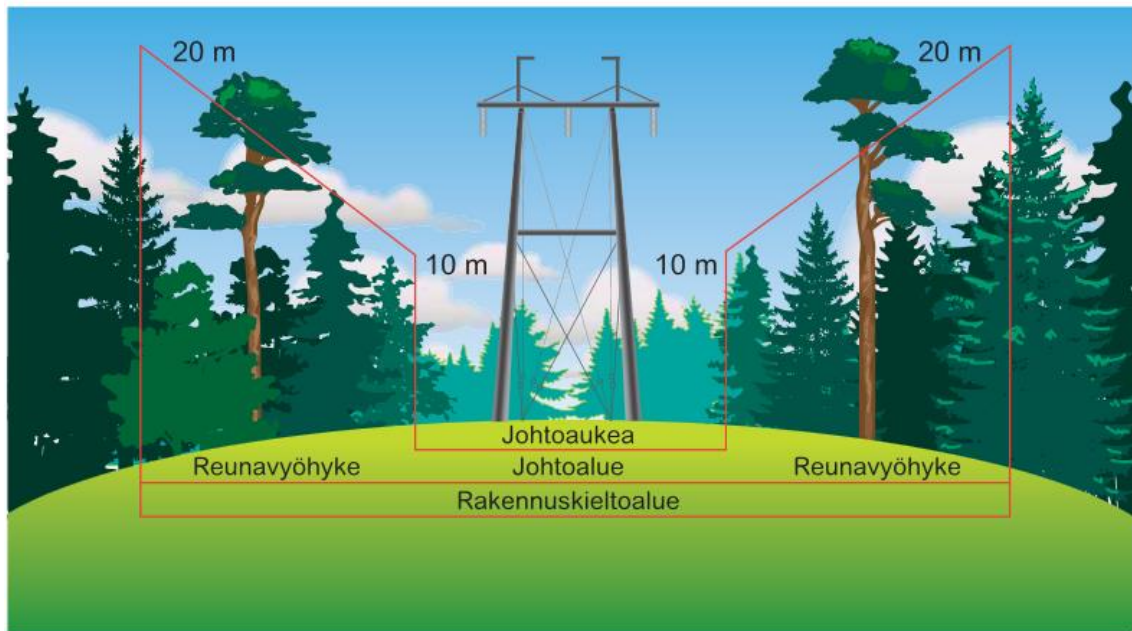
Fingrid Oyj:n omistamassa sähkönsiirron kantaverkossa johtoalueita on yhteensä n. 63 000 hehtaaria, josta metsää on noin 52 000 hehtaaria, peltoja n. 10 000 hehtaaria ja vesistöjä n. 1 000 hehtaaria. Normaalisti voimalinjaaukeiden raivauskiertona on pidetty kuutta vuotta ja vuosittainen raivausmäärä on noin 6 000 hehtaaria. (Fingrid Oyj 2016.)

On huomattavaa myös, että voimajohdon vierimetsän leveydeksi oletetaan keskimäärin 10 metriä voimajohdon kummallekin puolelle. Tällöin vierimetsien pinta-alaksi saadaan n. 140 000 hehtaaria metsämaata. Sähköverkot varaavat metsämaata yhteensä siis noin 200 000 hehtaaria. (MHY 2016.)

## **2.1 Voimajohtoaukeiden omistajuus**

Lunastuksesta huolimatta omistus- ja hallintaoikeus maapohjaan säilyvät aina maanomistajalla, vaikkakin käyttöoikeuksia rajoitetaan metsäalueella. Johtoaukealla ei saa kasvattaa puita, sekä johtoaukean ulkopuolisella vierialueella puiden kasvupituutta rajoitetaan. Maanomistaja on kuitenkin puiden omistaja koko johtoalueella. (MTK 2015, 22.) MTK:n oppaassa kielletäänkin kokonaan puiden kasvattaminen johtoaukealla. Yleensä metsätalouden toimijat ovat erikseen sopineet sähköyhtiöiden kanssa metsätalouden harjoittamisesta voimalinjojen alla. Pienemmillä johtoalueilla, joiden leveys on 6–10 metriä, ei saa kasvattaa talousmetsää, mutta joulukuusen kasvattaminen on mahdollista erillisellä luvalla (MTK 2015, 22).

Maanomistajilla ja muilla haitankärsijöillä on mahdollisuus saada korvauksia hankkeista aiheutuneista menetyksistä koskien omaisuutta tai oikeutta, myös vahingoista ja haitoista voidaan saada korvausta. Voimajohtojen korvausasiat käsitellään lunastustoimituksessa. (MTK 2015, 18.) Sähköyhtiö maksaa maanomistajille korvauksia, vaikka maanomistajat jatkaisivat viljelyä voimajohtojen rakentamisen jälkeen. Korvausten määrään vaikuttaa mm. sijainti ja elinkeinoharjoituksen luonne.



Kuva 1. MTK:n oppaassa oleva kuva jakelulinjasta, josta selviää voimalinjaa koskevat alueet ja vyöhykkeet (MTK 2015, 22).

Kuvan mukaan johtoaukean molemmin puolin on 10 metriä leveä vierimetsä ja heti voimalinjan välittömässä läheisyydessä metsikkö saa olla enintään 10 metriä pitkä, kun reunavyöhykkeen ulkorajalla – kauempana voimalinjasta – metsikkö saa olla enintään 20 metriä pitkä. Johtoaukealla voitaisiin siis kasvattaa sähköyhtiön erillisluvalla neljä metriä pitkä metsikkö voimajohtojen alla.

## 2.2 Biodiversiteetti

Biodiversiteettiä, eli luonnon monimuotoisuutta, voidaan kuvata kolmella eri tasolla ja yleisesti biodiversiteetillä kuvataan luonnon rikkautta. Eliöyhteisöjen tasolla kuvataan tietyn alueen eliöyhteisöjen monipuolisuutta, kun lajitasolla tarkoitetaan lajien lukumäärää ja niiden suhteellista runsautta. Lajin sisäisellä tasolla tarkoitetaan yhden lajin yksilöiden välistä perinnöllistä muuntelua. (Tapio 2013, 121.) Rakennepiirteiden säilyttämiseen ohjeistetaan yleisesti jättämään esimerkiksi taimikonhoitovaiheessa lehtipuita ja suosimaan sekapuustoisuutta

metsän kasvatuksessa. Tiheikköjä ja alikasvosta tulisi myös jättää ravinnoksi ja suojaksi eläimille (Tapio 2013, 121.)

*”Riistatiheikköjen koko vaihtelee muutaman alikasvoskuusen ryhmästä noin aarin kokoisiin laikkuihin. Tiheikössä voi olla kasvatettavien puiden lisäksi alikasvoskuusia ja monipuolista lehtipuustoa sekä pensaita”* (Tapio 2013, 122.) Metsänhoidon suosituksista ilmenee selkeästi tiheikköjen vaikutus biodiversiteettiin. Johtoaukeilla voitaisiin kasvattaa matalaa metsikköä tai energiapajukkoa tiheänä, jolloin se myös palvelisi biodiversiteettiä.

Metsälaissa (10 a§) on määritelty vielä lisäksi erityisen tärkeät elinympäristöt. Opinnäytetyö rajautuu kuitenkin voimalinja-aukeiden alla oleviin metsäalueisiin, eikä tässä ole tarkoitus tutkia tai ottaa käyttöön muita voimalinja-aukeiden alla olevia maa-alueita, kuten niittyjä, ketoja, luonnontilaisia soita tai joutomaita. Säännöllisesti raivatut ja hoidetut voimalinja-aukeat tarjoavat mahdollisesti korvaavan elinympäristön uhanalaisille niittyjen eläin- ja kasvilajeille (Kuussaari, Rytteri, Heikkinen, Manninen, Aitolehti, Pöyry, Pykälä & Ikävalko 2003, 3).

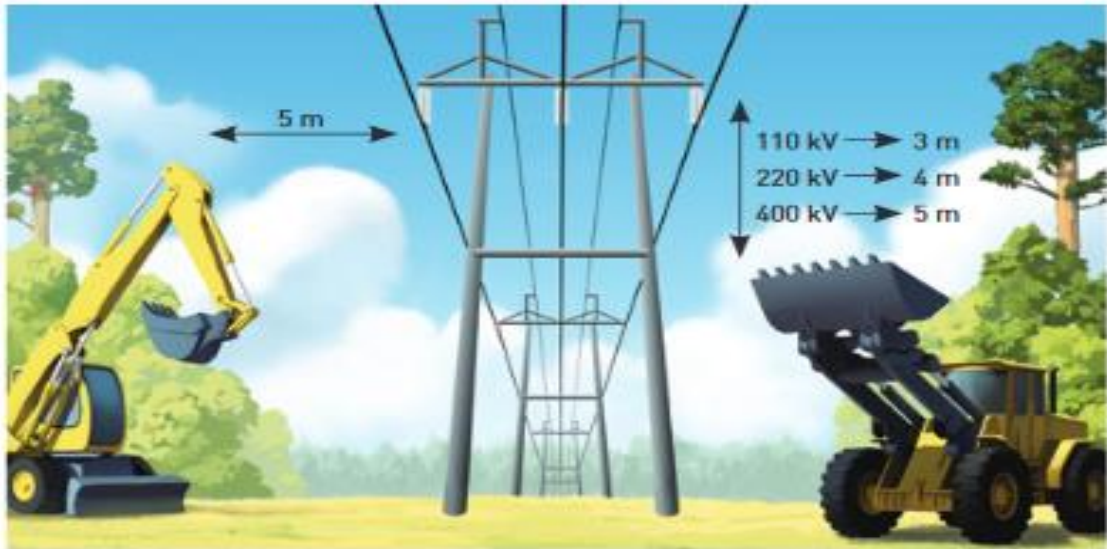
### **2.3 Työturvallisuus**

Työskennellessä voimajohtojen läheisyydessä on syytä noudattaa annettuja työturvallisuusohjeita. Fingrid Oyj antaa sivuillansa tarkat työturvallisuusohjeet koskien mm. varoetäisyyksiä. Ohjeista ilmenee kuitenkin nyrkkisääntö, ettei voimajohtojen läheisyydessä saa kasvaa mitään neljää metriä pidempää (Fingrid Oyj 2016). Tämä neljän metrin yleistetty sääntö antaa siis pohjan tutkimuksen varoetäisyydelle, eli se sanelee kasvatettavan taimikon valtapituuden maksimirajan. Tämän yleistyksen käyttämisen ajatuksena on yleissäännön helppous. Mikäli taimikot olisivat erimittaisia eri voimalinja-aloilla, olisi todennäköistä että taimikoiden kontrollointi vaikeutuisi ja siitä saattaisi myös syntyä ylimääräisiä menoja tai jopa vaaratilanteita.

Ennen työskentelyn aloittamista voimalinja-alalla tulee työntekijän selvittää aina etukäteen ilmajohtojen ja maakaapeliin sijainti, esimerkiksi ottamalla yhteyttä sähköyhtiöön työskentelyohjeiden ja -lupien saamiseksi. Varastojen ja lastauspaikkojen tulee olla riittävän etäällä johdosta ja kuljetusreitit tulee suunnitella



etukäteen. Erityisesti työkonoiden kuljettajien tulee olla tietoisia annetuista varoetäisyyksistä ja määräyksistä. (Fingrid Oyj 2016.)



Kuva 2. Fingrid Oyj:n hahmotelma varoetäisyyksistä (Fingrid Oyj 2017, 18).

Fingrid Oyj:n kuvasta selviää, ettei työkonella työskennellessä mikään esine tai koneen osa saa joutua alapuolella tai sivusuunnassa olevia mittoja lähemmäksi johtimia (Fingrid Oyj 2017, 18).

## 2.4 Sähköstaattinen purkaus

Sähköstaattisessa purkauksessa riittävän suuri sähkökenttä irrottaa elektroneja eristeen rakennosista. Elektronit törmäävät toisiin rakennosiin, jolloin vapautuu lisää elektroneja. Aine ionisoituu ja alkaa johtaa sähköä. Ilmiö on havaittavissa esimerkiksi ilmassa johdekappaleen kärkien lähellä tai sellaisessa tilanteessa, jossa kaksi varattua johdepintaa ovat lähellä toisiaan. (Suvanto & Laajalehto 2005, 58.)

Valokaari on ilmiö, jossa sähkövirta on suhteellisen suuri ja lämpövirta purkaukskanavassa saattaa nousta jopa kymmeneen tuhansiin asteisiin. Purkaukseen liittyy myös voimakkaasti valaisevaa sähkövirtaa ja ääntä, eli ilmiön voi todellisesti havaita. (Suvanto ym. 2005, 58.) Mahdolliset sähköpurkaukset voimajohtojen läheisyydessä työskennellessä voivatkin olla valokaari-ilmiöitä.

Sähkölujuus on termi, jolla tarkoitetaan suurinta sähkökentän voimakkuuden arvoa, jolla aine pysyy vielä eristeenä eikä siis ionisoidu. Materiaali ionisoitessaan muuttuu sähköä johtavaksi. Sähkölujuuteen vaikuttaa mm. lämpötila ja epäpuhtaudet. Ilman sähkölujuus on 3 kV/mm. Sähkölujuuteen vaikuttaa kuitenkin moni muu asia lämpötilan ja ilman epäpuhtauksien lisäksi, joten taulukkoarvot ovat likimääräisiä. (Suvanto ym. 2005, 58.) Ilman sähkölujuus sateisella säällä voi kuitenkin hetkellisesti pudota arvoon 0,4–0,5 kV/mm, koska sadepisarat voimistavat kenttää siten, että pisaroiden ympärillä vallitseva kenttä aiheuttaa läpilyönnin. (Tuomi 2017.) Sähkölujuus -termi tunnetaan myös terminä dielektrinen lujuus tai läpilyöntilujuus.

Sähköstaattiselle purkaukselle voidaan johtaa tietyissä olosuhteissa laskelmia, jotka osoittavat, millä etäisyydellä ja kuinka pitkäksi valokaari voi ilmetä. Yksi ehto näille laskelmille on se, että sähkökentän tulee olla homogeeninen. Voimajohtojen sähkökenttä on epähomogeeninen, jolloin valokaaren ennustaminen muuttuu ongelmalliseksi. Myöskin terävän kärjen kohdalla sähkökenttä on voimakkaampi, jolloin on todennäköistä, että sähköstaattinen purkautuminen alkaa kohti terävää kärkeä. Muun muassa näiden seikkojen vuoksi laskennallisia arvoja ei suoraan voida käyttää turvaväliden arviointiin.

### **3 Metsätalouden harjoittaminen voimajohtoaukeilla**

Puiden yms. kasvattamiseen voimajohtoaukeilla antaa Fingrid Oyj virallisen lausunnon. Lausunto käsittelee toimintaa mm. turvallisuuden ja käyttövarmuuden näkökulmasta ja siitä, onko toiminta sallittavaa johtojen alla. (Jalonen 2017.) Yleisesti voidaan siis sanoa, että harjoitettava toiminta voimajohtojen alla vaatii sopimuksen sähköverkon haltijan kanssa.

Merkittävimmäksi rajoitteeksi metsätalouden harjoittamisen kannalta ilmenee voimajohtojen korkeus maanpinnasta. Metsämaalla johtimen korkeuden tulee olla vähintään 5,9 m 110 kV jännitetasolla, 6,5 m 200 kV jännitetasolla ja 7,9 m

400 kV jännitetasolla. Mitään yleispätevää korkeusarvoa ei voitaisi antaa ja johtimen korkeuteen maanpinnasta vaikuttaa mm. kuormitus ja ulkolämpötila, joten voimajohtojen johtimien korkeudet voivat vaihdella huomattavasti eri alueiden välillä. (Jalonen 2017.)

### 3.1 Metsätaloudessa yleisesti käytetyt puulajit

Voimajohtoaukeilla harjoitettavassa metsätaloudessa käytettäisiin ja sovellettaisiin metsänhoidon suosituksia, jotka ovat laatineet Tapio. Metsänhoidon suositukset ovat tutkimukseen ja käytännön kokemukseen perustuvia suosituksia. Ne luovat pohjan metsäalan yhteisille menettelytavoille.

Taulukko 1. Puulajin ja uudistamismenetelmän valinta. Vihreä = suositellaan, keltainen = suositellaan varauksin, 0 = muokkaamaton, P = maanpintaa paljastava muokkaus, K = kohoumia muodostava maanmuokkaus. (Tapio 2013, 46.)

Kasvupaikkatyyppi	Lehtomainen kangas tai sitä viljavampi			Tuore kangas			Kuivahko kangas			Kuiva kangas tai sitä karumpi	
	Hieno	Keski-karkea	Karkea	Hieno	Keski-karkea	Karkea	Hieno	Keski-karkea	Karkea	Keski-karkea	Karkea
Maalaji											
Mänty, istutus					P/K	P	K				
Mänty, kylvä								P	P	P	
Mänty, siemenpuu								P	P	P/0	0
Kuusi <sup>1</sup> , istutus	K	K	K	K	K	P	K <sup>2</sup>	K/P <sup>2</sup>			
Kuusi <sup>1</sup> , kaistale	0	P/0	P/0	0	P/0		0 <sup>2</sup>	P/0 <sup>2</sup>			
Kuusi <sup>1</sup> , suojuspuu	0 <sup>3</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>3</sup>	0 <sup>3</sup>		0 <sup>2,3</sup>	0 <sup>2,3</sup>			
Rauduskoivu, istutus		K/P	P		K/P						
Rauduskoivu, kylvä					P <sup>4</sup>						
Rauduskoivu, siemenpuu					P <sup>4</sup>						

Taulukosta 1 käy selväksi puulajikohtainen uudistamismenetelmän valinta maalajiluokittain eteläisessä ja keskisessä Suomessa. Näitä metsänhoidon suosituksia käytetään myös tässä tutkimuksessa. Männyn uudistamiselle suositellaan kylvää maanpintaa paljastavalla muokkauksella tai kohoumia paljastavalla muokkauksella, riippuen maalajista. Kuuselle suositellaan kohoumia muodostavaa maanmuokkausmenetelmää ja viljelylle istutusta. Rauduskoivua viljeltäisiin istuttaen kohoumia muodostavalla maanmuokkauksella tai maanpintaa paljastaen.

### 3.1.1 Mänty

Mänty on valopuu ja se kasvaa laadukkaaksi tukkipuuksi kuivahkoilla ja karummilla kankailla. Hyvälaatuisen männyn kasvattaminen edellyttää riittävän tiheää ja hidaskasvuista nuoruusvaihetta. (Tapio 2013, 26.) Männyn viljely tapahtuu yleisimmin kylväen, jolloin taimikkoon saadaan tukkipuun kasvatuksen edellyttämät 4 000–5 000 tainta hehtaarille. Kylvö sopii kuivahkoille ja kuiville kivennäismaille. Sopiva maanmuokkaus kylvömännikölle on äestys tai laikutus. Luontainen uudistaminen voidaan myös yhdistää kylvöön, jolloin uudistamiskustannukset ovat pienemmät. (Tapio 2013, 48.)

Voimajohtoaukeiden alla kasvatettaisiin mäntytaimikkoa ensimmäisessä simulaatiossa neljän metrin valtapituuteen. Valtapituus tarkoittaa sadan rinnankorkeudelta paksuimman puun keskipituutta hehtaarin alalta. Toisessa simulaatiossa mäntymetsikköä kasvatettaisiin kahdeksan metrin valtapituuteen asti, jota seuraa päätehakkuu. Molemmissa simulaatioissa noudatetaan metsänhoidon suosituksia, mikä tarkoittaa sitä, että taimikonhoitotoimenpiteet suoritetaan ohjeiden mukaisesti. Myöskin luontaiselle uudistamiselle männyn osalta simuloidaan omat kasvatusketjunsä, vaikkei voimajohtoaukeilla suoranaisesti voidaakaan hyödyntää luontaista uudistamista.

### 3.1.2 Kuusi

Kuusi on puolivarjopuu, joka menestyy alikasvoksena ja valtapuuna. Sopivimpia kasvupaikkoja kuuselle ovat tuoreet ja lehtomaiset kankaat sekä lehdot. Karummilla kasvupaikoilla kuusta voidaan kasvattaa sekapuuna esimerkiksi männyn kanssa. Kuusi reagoi herkästi harvennukseen, jolloin yksittäisen puun järeys kasvaa nopeasti harvennuksen jälkeen. Kuusi kestää myös ylitheyttä paremmin kuin rauduskoivu tai mänty. (Tapio 2013, 26.)

Kuusen uudistaminen istuttamalla on varma ja nopea tapa, vaikkakin kuusen alkukehitys on muihin puulajeihin verrattain hitaampaa. Istutustiheyden tulisi olla

hyvää puuntuotosta tavoitellen lehtomaisilla kasvupaikoilla 2 000 tainta hehtaarilla. Kuusen viljelyssä oikea maanmuokkaustapa ja taimikonhoito ovat avainasemassa, koska kuusen kasvualusta on viljavaa, se heinittyy nopeasti. Kuusen istutukselle suositellaan kohoumia muodostavia muokkausmenetelmiä, kuten mätästystä. Mätäs antaa taimelle hyvän alustan kasvuun ja antaa suojan tukkimiehentäitä vastaan. (Tapio 2013, 49.) Simuloinnissa luodaan kuusikko metsänhoidon suositusten mukaisesti. Kuusikkoa kasvatetaan simulaatiossa kahdeksan metrin valtapituuteen jonka jälkeen se päätehakataan.

### **3.1.3 Rauduskoivu**

Rauduskoivu on valoa vaativa puu, joka kasvaa parhaiten lehdossa ja lehtomaisilla kankailla. Rauduskoivua voidaan kasvattaa myös moreenimailla, mikäli vesitalous on kunnossa. (Tapio 2013, 27.) Rauduskoivua uudistetaan istuttamalla 1 600 tainta hehtaarille. Maanmuokkaukseksi suositellaan laikkumätästystä tai laikutusta. Koivun kylvö on istutusta edullisempi menetelmä, mutta epävarmempi. Koivua voidaan kuitenkin kylvää alueille joissa on pienempi hirvituhon riski. Kylvöä varten uudistusala tulisi muokata maanpintaa reilusti paljastavalla menetelmällä, esimerkiksi tiheällä äestyksellä. Rinnemailla voidaan käyttää myös luontaista uudistamista ja koivut tuottavat siementä lähes joka vuosi. Siemenpuita tulisi olla 10–20 hyvälaatuista rauduskoivua hehtaaria kohti. (Tapio 2013, 50.)

Voimajohtoaukeilla ei voida suoranaisesti hyödyntää luontaista uudistamista, vaan luontaisessa uudistamisessa pitää turvautua vieressä olevan metsikön puustoon, jolloin luontaisen uudistamisen mahdollisuus pienenee. Simuloinnissa luodaan rauduskoivikko metsänhoidon suositusten mukaisesti istuttamalla tavoitetiheyteen. Rauduskoivikkoa kasvatetaan kahdeksan metrin valtapituuteen jonka jälkeen se päätehakataan.

### 3.1.4 Hieskoivu

Hieskoivulle uudistamista suositellaan pääsääntöisesti turvemaille, istutuksella tai kylvöllä. Metsälaissakin määritellään, että taimikon saa perustaa hieskoivun taimilla tai siemenillä vain turvemaille, kangasmaiden soistuneissa osissa ja tiiviillä savi- tai hiesuvaltaisilla mailla. Muilla kasvupaikoilla hieskoivua voidaan käyttää sen kasvupaikasta ja alueen maantieteellisestä sijainnista riippuen täydentävänä puulajina. (Metsälaki 1093/1996.)

Tässä tutkimuksessa ei tutkita mahdollista hieskoivun uudistamista voimajohtoaueille, koska hieskoivun taimikon kehitystä ei voida MOTTI-ohjelmistolla simuloida. Vaikka metsänomistaja perustaisi hieskoivikon kivennäismaalle, olisi hänen kuitenkin esitettävä riittävä selvitys hieskoivun alkuperästä ja kasvatuskelpoisuudesta uudistettavan alueen olosuhteisiin.

Hieskoivua voidaan hyödyntää energiapuuna esimerkiksi vanhoilla turvemaille, jolloin taimikko kasvatetaan hoitamatta n. 11 metrin pituuteen. Hieskoivu myös uudistuu luontaisesti todella herkästi ja kasvaa tiheänä, jolloin mahdolliset perustamis- ja hoitokustannukset jäävät alhaisiksi. Hieskoivu ei myöskään ole yhtä herkkä hirvituhoille kuin rauduskoivu. (Verkasalo 2007, 14–17.)

## 3.2 Taimikonhoito voimajohtoaueilla

Varhaisperkaus on taimikonhoidon tärkein työlaji, jossa varmistetaan istutettujen tai kylvettyjen puiden elintila poistamalla haittaava puusto taimien läheltä. Riippuen kasvatettavasta puulajista, poistetaan siis varhaisperkauksessa pääpuulajia haittaava kilpaileva puusto. Esimerkiksi männikössä varhaisperkauksessa poistetaan kilpaileva koivu. Kaikkea ei tarvitse poistaa, vaan osa kilpailevasta lehtipuustosta voidaan jättää täydentämään taimikkoa. Varhaisperkaus on tarkoitus toteuttaa noin viiden vuoden kuluttua taimien istutuksesta tai kylvöstä. Voimajohtoaueilla kasvatettavassa taimikossa voidaan mahdollisesti toteuttaa taimikon

varhaisperkaus ja muitakin taimikonhoitoon liittyviä hoitotoita, kuten heinäntorjunta.

Taimikonharvennus on taimikonhoidon työlaji, joka tulisi toteuttaa esimerkiksi tiheässä kylvömännikössä keskipituuden ollessa 3–4 metriä. Taimikonharvennus kuusella toteutettaisiin keskipituuden ollessa 3–4 metriä ja koivulla 4–5 metrin keskipituudessa. On oletettava, ettei kasvatettavassa neljän metrin valtapituudessa taimikossa voimajohtoaukeilla tehdä taimikon harvennusta, koska jo kohta taimikon harvennuksesta seuraisi taimikon päätehakkuu. Simulaatioissa, joissa valtapituus on kahdeksan metriä, suoritetaan taimikon harvennus neljän metrin valtapituudessa.

### **3.3 Energiapuun korjuun vaikutukset metsiin**

Kokopuun korjuu on luonteeltaan ainespuun korjuuta intensiivisempää metsien käyttöä, eli pois kuljetetun ravinteiden ja biomassan osuus on kokopuun korjuussa suurempaa. Tämä tarkoittaa sitä, että alueelta häviää enemmän ravinteita ja siten vaikuttaa päätehakkuun jälkeen uudistettavan metsikön kasvuun. Kivennäismailla kasvua rajoittaa yleensä typpi. (Ilvesniemi, Hartman, Hytönen, Lauren, Kaila, Kantola, Kiikkilä, Kremsa, Kubin, Lindgren, Lindroos, Moilanen, Murto, Nieminen, Nieminen, Penttilä, Piispanen, Saarsalmi, Smolander, Tamminen, Ukonmaanaho 2012, 75.)

Voimajohtoaukeilla harjoitettavassa metsätaloudessa, eli taimikoiden kasvattamisessa ennalta määrättyyn keskipituuteen asti, kasvatettua metsikköä käsiteltäisiin metsäpeltona. Metsäpelto -termillä tarkoitan tässä tutkimuksessa sitä, että ennalta määrättyyn keskipituuteen kasvanut taimikko tai puusto päätehakattaisiin kokonaan, eikä alalle jäisi yhtäkään puuta.

Kuten jo aiemmin todettiin, yleensä typpi rajoittaa puiden kasvua. Tuoreen hakkuutähteen korjaaminen kuusikoissa tietää suurten ravinnemäärien poistumista kasvupaikalta. Ensiharvennusten hakkuutähteen typpimäärä vastaa usean vuoden karikesadon typpimäärää. (Ilvesniemi ym. 2009, 57–58.) On todennäköistä, että voimajohtoaukeiden alla harjoitettavassa metsätaloudessa käyte-

tään lyhyttä kiertoa, eli metsikkö kasvaa korkeintaan n. 15 vuoden ikäiseksi, riippuen sähköyhtiön määräämistä varoetäisyyksistä tai -pituuksista. Tällöin nuori taimikko hakattaisiin päätehakkuuna kokonaan pois ja sitten haketettaisiin, jotta alueelle voitaisiin uudistaa taimikko nopeasti.

Taimikoiden kehitystä ja hakkuutähteiden pois vientiä on tutkittu jokseenkin niin Suomessa kuin Ruotsissa. Metla 2009 oppaan mukaan nuorilla taimikoilla ravinteiden tarve on aluksi vähäistä ja hakkuutähteiden korjuun aiheuttama kasvun aleneminen saattaa ilmetä myöhemmin. Rautavaaralla toteutetun tutkimuksen mukaan hakkuutähteen korjuulla ei ole vaikutusta pituuskehitykseen tai elossa säilymiseen ensimmäisen 10-vuotiskauden aikana. Koealue muokattiin auroamalla, joka lisää riskiä sille, että hakkuutähteen korjuun vaikutus on peittynyt voimakkaan maaperän muokkauksen aiheuttamiin muutoksiin taimien elinympäristössä. Ruotsissa toteutettujen tutkimusten mukaan hakkuutähteiden vienti viljavilta alueilta vaikuttaa pituuskasvuun n. 10 vuoden jälkeen päätehakkuusta. (Metla 2009, 60–61.)

Mikäli voimajohtoaukeilla kasvatetaan taimikoita metsäpeltotyypisessä, voidaan olettaa että ilman typpilannoitusta taimikon kehitys saattaa jossain vaiheessa taantua. Taimikon kehityksen taantumiseen voi kuitenkin mennä pitkään aika, koska taimikko itsessään vaatii vähän typpeä eikä siihen siten ole sitoutunut suuria määriä typpeä, eli ravinnekato ei ole kovinkaan huomattava. Taimikkoihin sitoutuneen typen määrää on kuitenkin tutkittu vain vähän.

### **3.4 Metsähake**

Metsähake on yleisnimitys metsästä energiakäyttöön tarkoitetuille hakkeille. Hake on koneellisesti leikattua tasakokoista lastua, jota yleisimmin leikataan hakkurilla puuraaka-aineesta. Yleensä palakoko hakkeella on 0,5–3 cm ja palahakkeella 5–10 cm. Erilaisia hakkeita ovat mm. kokopuu-, osapuu-, poltto- ja viherhake. Todennäköisimmin voimajohtoaukeilta kerättävä puuraaka-aine olisi verrattavissa kokopuu- tai viherhakkeeseen.



Voimajohtoaukeilla kasvatettaisiin työturvallisuuden ohjeita noudattaen korkeintaan neljämetristä taimikkoa, joka päätepituutensa saavutettua korjattaisiin kokopuukorjuuna. Neljämetrinen taimikko ei todennäköisesti saavuta läpimittansa puolesta kuitupuun mittavaatimuksia, joten luonnollisin tapa jalostaa tämä puuraaka-aine olisi hakettaa se kokopuuna. Yleisesti kuitupuulle asetetut minimiläpimitat ovat joko 6 tai 7 cm (Tapio 2008, 1–2).

Hakkeesta saatava lämpöarvo määrää hakkeen laadun. Hakkeen energiakäytössä olennaisia ominaisuuksia ovat mm. palakoko, kosteus ja hakkeen tasalaatuisuus. Myös viherainepitoisuudella on merkitys hakkeen laatuun ja kestävyys-teen. Kuitenkin suurin laatuun vaikuttava tekijä näistä on kosteus jota seuraa palakoko.

Kosteus vaikuttaa suoranaisesti lämpöarvoon. Kosteus aiheuttaa myös ongelmia varastoinnissa ja palotapahtumassa. Veden haihduttaminen kuluttaa lämpöenergiaa jopa 0,7 kWh/kg. (Hakkila 2004, 68.) Liika kosteus aiheuttaa siis huonompaa palamista ja siten myös polttoaineen kulutus nousee ja lämpölaitoksen hyötysuhde heikkenee.

Palakoko ei kuitenkaan vaikuta paljolti hakkeen polttotapahtumaan, vaan hakkeen seassa mahdollisesti olevat ylisuuret tikut voivat aiheuttaa esimerkiksi kuljettimilla häiriöitä, mm. holvaantumista. (Alakangas 2000, 56.) Erilaiset ongelmat kuljettimissa aiheuttavat suurentuneita huoltoseisokkeja ja lämpölaitoksen hyötysuhde heikkenee. Tasalaatuisuus nousee sitä tärkeämmäksi tekijäksi, mitä pienempi lämpölaitos on kyseessä. Mikäli haketta käytetään esimerkiksi pien-CHP-laitoksessa, on hakkeen tasalaatuisuudella suuri merkitys prosessin toimivuuteen. (Etelätalo 2013, 14.)

Viherainepitoisuudella tarkoitan tässä tutkimuksessa hakkeen sisältämää neulas- ja lehtimassaa. Neulas- ja lehtimassassa esiintyy ja sitä tarvitaan yhteyttämisessä. Poltossa kloori poistuu kaasuna ja saattaa aiheuttaa höyrykattiloissa korroosiota. (Alakangas 2000, 12.)

Kokopuuhake on tikkuisempaa kuin rankapuuhake, joten kokopuuhakkeen käyttö esimerkiksi stokeripolttimessa ei onnistu yhtä hyvin kuin rankapuuhakkeen. Suurin ongelma on kokopuuhakkeen holvaantuminen varastosäiliössä, kun ri-

sut, lehdet ja neulaset takertuvat toisiinsa, eikä hake valu alaspäin säiliössä. Hakkeen takertumisen seurauksena syöttölautanen ja ruuvi saavat huonon otteen hakkeesta josta seuraa palamistehon heikentyminen. Myöskin risut lajittuvat hakesäiliön tiettyihin osiin ja aiheuttavat ongelmia palamistehoon. Kokopuuhakkeen kosteusvaihtelut ovat myöskin suurempia kuin rankapuuhakkeen. (Lötjönen 1996, 3.)

### 3.5 Energiapaju

Energiapaju poikkeaa yleisesti käytetyistä puulajeista siten, että sitä itse viljellään pellolla, toisin kuin yleisesti käytettyjä puulajeja. Energiapaju vaatii kasvu- paikaltaan runsaasti ravinteita ja kosteutta, joten OMT- tai MT-tyyppinen kasvu- paikka olisi mahdollisesti sopiva energiapajukäyttöön.

Mineraalimaapohjan tulisi olla pH-arvoltaan 6–6,5 (Hurskainen 2015, 7). Metsämaalla toimiessa energiapajun istutusura jyrsitään 20–30 cm syvyyteen (Suutari 2017). Energiapajun istuttaminen tapahtuu riveihin ja hehtaarille voidaan istuttaa jopa 13 000 pistokasta. Istutusta ei tarvitse suorittaa jokaisen korjuun jälkeen, vaan pistokkaasta voidaan korjata satoa yhteensä jopa 25 vuoden ajalta. Korjuu tapahtuu kuitenkin 3–4 vuoden välein. Pellon päihin tulisi jättää n. 10 metrin päisteet, jotta korjuukoneella olisi tilaa kääntyä, myöskin reunamille tulisi jättää n. 3 metrin levyiset piennaralueet. (Ahvenniemi 2017.) Energiapajuviljelmien vuotuinen tuotto hyvin viljeltynä on n. 14–16 kiintokuutiota hehtaarilla (VTT 2017). Myöskin Tanskassa energiapajua on viljelty energiakäyttöön ja kasvuksi arvioidaan n. 2 metriä vuodessa ja korjuu voi tapahtua 2–4 vuoden välein (Stenkjaer 2009).

Energiapajun viljelmän perustaminen vaatii myös suuria viljelykokonaisuuksia, minimissään 10–20 hehtaarin yksiköitä (Suutari 2017). Hyvin viljeltynä energiapaju vaatii myös paljon ravinteita, vettä ja lannoitusta. Vaikka toimittaisiin metsämaalla, joka on muunnettu pelloksi, voidaan mahdollisesti päästä samoihin tuloksiin kuin peltomaalla hyvin viljeltynä. Energiapajun kasvattamista sellaiseen metsämaalla ei ole juurikaan tutkittu, vaikkakin esimerkiksi Keski-

Suomessa ja Pohjois-Karjalassa mahdollisia energiapajulle soveltuvia metsätalouden näkökulmasta vajaatuottoisia metsäkohteita on kartoitettu mahdolliseen energiapajukäyttöön.

Energiapajun on raportoitu vaikuttavan negatiivisesti polttokattilan käytettävyyteen, koska energiapaju likaa lämmönsiirtopinnat ja voimalaitoksissa on havaittu nopeampaa tulistikorroosiota. Energiapaju sisältää tavanomaisia puubiomasoja enemmän kaliumia, fosforia ja ehkä myös klooria, joka aiheuttaa energiapajun poltossa haasteita, kuten likaantumista ja tulistinmateriaalien kuumakorroosiota. (Kärki & Hurskainen 2015, 6.)

Polttokokeita on suoritettu mm. Fortumin Joensuun 30 MW lämpölaitoksessa. Polttokokeiden päätavoitteina oli hankkia käytännön kokemusta sekä tutkia lentotuhkien koostumusta ja polttoaineen syötettävyyttä. Polttokokeissa jouduttiin käyttämään murskattua energiapajua, koska hakkuria ei saatu käyttökuntoon. Tuloksista ilmenee, että tikkumaisen energiapajumurskeen syöttäminen aiheuttaa ongelmia, koska kokeessa murske aiheutti tukoksia ja rajoitti kattilasta saatavaa tehoa pelkällä energiapajulla. Energiapajumurskeen määrää nostettaessa energiatiheys siis aleni. 100 %:n poltto energiapajulla myöskin aiheutti suurempia ravinne- ja raskasmetallipitoisuuksia lentotuhkiin ylittäen metsälannoitekäytön raja-arvot. (Kärki 2015, 17.)

## **3.6 Taloudellinen kannattavuus**

### **3.6.1 Nettotuottojen nykyarvo**

Nettonykyarvo on yksi investoinnin kannattavuuden mittari. Kaikki investoinnista kertyvät tuotot ja kustannukset diskontataan nettonykyarvolaskennassa nykyhetkeen käyttäen valittua laskentakorkokantaa (Hoffrén 2011). Investointi on kannattava, mikäli summattu tulos on positiivinen. Tällöin investoinnista kertyvien nettotuottojen ja mahdollisten jäännösarvojen summa on suurempi kuin investoinnin aiheuttama hankintameno ja muut kustannukset.

Diskonttauksella tarkoitetaan rahavirran siirtämistä ajassa taaksepäin, käyttäen korkolaskennan keinoja. Tässä tutkimuksessa rahavirrat diskontataan nykyhetkeen. Diskonttauksen yksi sovellutus on esimerkiksi selvittää, kuinka kauan tulisi tietynä päivänä sijoittaa pääomaa, jotta tietyn ajan kuluttua pääoma olisi kasvanut korkoa sen verran, että pääoman suuruus olisi halutulla tasolla. (Cederberg 2017.)

Nettotuottojen nykyarvon laskemista käytetään nykyisin laajalti metsätaloudessa, joten sen käyttö on perusteltua myös tässä tutkimuksessa. Nettotuottojen nykyarvoihin vaikuttaa myös pääoman korkovaatimus, joka tässä tutkimuksessa on 3 %.

### **3.6.2 Metsähake**

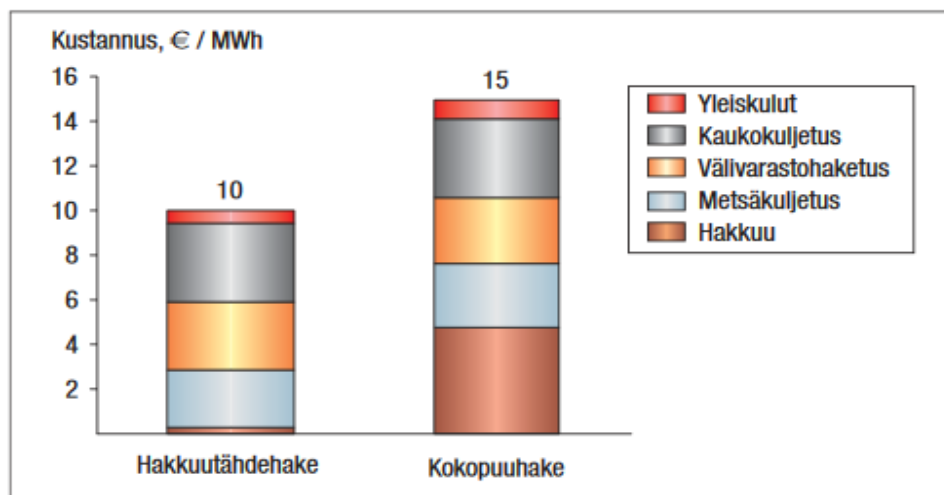
Käytännössä voimajohtoaukeilta korjattavaa puuainesta voitaisiin tarkastella pienpuuhakkeen näkökulmasta. Aiheesta on tehty paljon erilaisia tutkimuksia, joten tässä opinnäytetyössä ei suoriteta esimerkiksi konekustannuslaskentaa, vaan tarkastellaan kannattavuutta viitaten jo tutkittuun tietoon.

Voimajohtoaukeat Suomessa ovat alueita, joilla vallitsee rakennuskielto, kuten kuvasta 1 ilmenee. Rakennuskielto tarkoittaa myös sitä, ettei rakennuskiellossa oleville alueille saa minkäänlaisia kestävän metsätalouden rahoituslakiin perustuvia tukimuotoja. Voimajohtoaukeilla sijaitsevilla metsämailla käytettävä hakkuutapa olisi päätehakkuu. Päätehakkuihin ei myöskään saada kestävän metsätalouden rahoituslakiin perustuvia tukia. Tällöin voidaan jo karkeasti olettaa, ettei metsätalouden harjoittaminen alueilla ole taloudellisesti kannattavaa.

Taloudelliseen kannattavuuteen energiapuun korjuussa vaikuttaa mm. biomassalähde, kuljetusmatka, pinta-alakohtainen kertymä ja energiatiheys. Biomassalähteen osalta kustannukset ovat edullisimmat juurikin päätehakkuualueiden hakkuutähteellä ja suurimmat harvennusten pienpuulla. Kuljetusmatka aiheuttaa huomattavan osan metsähakkeen tuotantokustannuksista, ja tämän takia metsähake nähdään paikallisena polttoaineena. Tuotantokustannukset alenevat sitä mukaan, mitä suurempi on leimikkokohtainen kertymä, koska esimerkiksi ko-

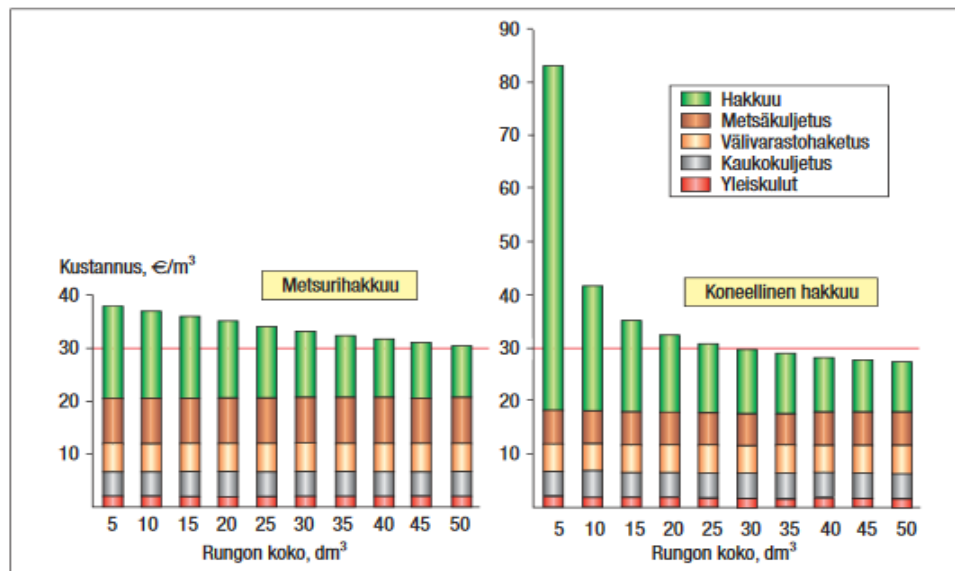
neiden siirto leimikosta toiselle, logistiikka ja työnjohto aiheuttavat lisäkuluja. (Hakkila 2004, 65.) Energiatiheydeltään paras vaihtoehto olisi täysin kuiva raaka-aine, koska voimalaitokset yleensä maksavat metsähakkeesta energiatiheyden mukaan, eli €/MWh.

Metsähakkeen keskimääräinen hinta käyttöpaikalla on n. 21 €/MWh. Hinta on koko maan määrällisesti painotettu keskihinta. (Metsälehti 2017.) Tätä hintaa voidaan pitää korvauksena, joka saadaan lämpölaitokselta, kun sinne myydään metsähaketta. Kannattavan talouden harjoittaminen vaatii voiton saamisen hakkeen myynnistä, eli kyseisen hinta sisältää esimerkiksi voittolisän, jonka yritys omalle toiminnalleen vaatii.



Kuvio 1. Hakkuutähdehakkeen ja kokopuuhakkeen kustannusrakenne. (Hakkila 2004, 65)

Hakkilan laatimasta kuviosta (1) käy selville kokopuu- ja hakkuutähdehakkeen välillä. Tutkimuksessa tarkastellaan kokopuuhaketta, ja kuviosta (1) nähdään kokopuuhakkeen kustannuksen olevan 15 €/MWh. Suurimman kustannuserän aiheuttaa hakkuu. Tuotantoketjussa nähdään haketusmuodon olevan välivarastohaketus, joka on hyvin yleinen haketus tapa energiapuun tuotantoketjussa.

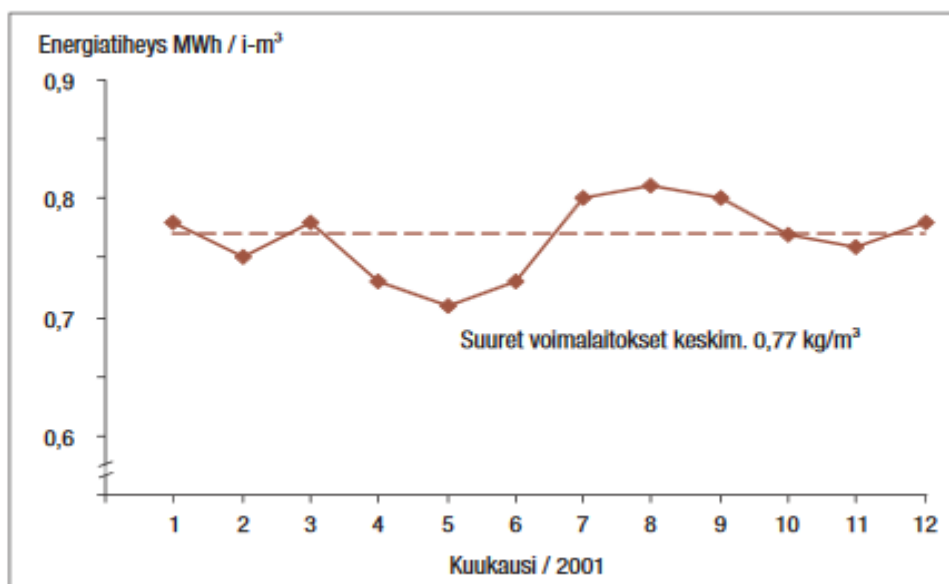


Kuvio 2. Kokopuuhakkeen kustannusrakenne rungon koosta riippuen (Hakkila 2004, 66).

Kuviosta 2 käy selville rungon koon vaikutus kustannusrakenteeseen kokopuuhakkeen tuotannossa. Mitä pienempi rungon koko on, sitä suuremmaksi hakkuukustannus kasvaa. Muut kustannuslajit pysyvät hyvinkin samanarvoisina, riippumatta rungon koosta.

Voimajohtoaukeilla kasvatettavassa puustossa rungon keskikoko neljän metrin valtapituudessa on todennäköisesti vähemmän kuin 5 dm<sup>3</sup> ja kahdeksan metrin valtapituudessa rungon keskikoko saattaa ylittää lähelle 15 dm<sup>3</sup>:a. Runkojen keskikoko voidaan laskea MOTTI-ohjelmistolla vain aritmeettisena keskiarvona, eli runkojen kokonaismäärä kappaleissa jaetaan hehtaarikohtaisella tuotoksella. Tulos sisältää keskivirhettä. Kokopuuhakkeen kustannukseksi voidaan arvioida puuston kahdeksan metrin valtapituudessa n. 35 €/m<sup>3</sup>. Neljän metrin valtapituudessa kokopuuhakkeen kustannus voi olla jopa 60 €/m<sup>3</sup>.

Korjuukustannukset lasketaan Metsäntutkimuslaitoksen tarjoamalla kokopuuhakkeen kustannuslaskentaohjelmalla sekä taimikoille että puustoille. Kustannuslaskennassa käytetään jo laskurissa valmiina olevia tietoja ja vain leimikkotietoja muutetaan tapauskohtaisesti.



Kuvio 3. Metsähakkeen keskimääräinen energiatiheys vuonna 2001 kolmen suuren voimalaitoksen keskiarvona (Hakkila 2004, 71).

Kuviosta 3 käy selville metsähakkeen keskimääräinen energiatiheys. Koko vuodelle annettu keskimääräinen energiatiheys on 0,77 MWh/i-m<sup>3</sup>. Kiintokuution, eli m<sup>3</sup>:n ja irtokuution, eli i-m<sup>3</sup>:n välinen ero on 2,5. Yksi kiintokuutio vastaa siis 2,5 irtokuutiota. Voimajohtoaukeilta saatava biomassa voidaan kertoa 2,5:llä, jolloin saadaan tuotos irtokuutioissa, ja sitten kertoa vielä keskimääräisellä energiatiheydellä, jolloin saadaan leimikon keskimääräinen energiatiheys.

### 3.6.3 Energiapaju

Energiapajun kasvattaminen vaatii paljon panostusta kasvatusta harjoittavalta henkilöstöltä. Samoin kuten metsätalouden harjoittamisessa, voidaan olettaa viljelytekniikoiden olevan optimoituja, viljelyalojen olevan suuria ja käytössä olisi erikoiskoneita. Energiapajuhakkeen myyntihinnan voidaan myös olettaa olevan sama kuin metsähakkeen, eli 21 €/MWh. Tukipolitiikka rakennuskieltoalueella toimittaessa on myös varsin samanlainen kuin metsätaloudessa. Voidaan olettaa, ettei voimajohtoaukeilla harjoitettavaan toimintaan saada viljelytukea.

Energiapaju korjattaisiin suoraan hakkeeksi. Tällöin kuitenkin syntyy märkää haketta, jota ei voi kuivattaa luonnollisesti. Märän hakkeen säilyvyys on myös huono. Koska energiapaju korjataan suoraan hakkeeksi, vaatii kalusto suuren laiteinvestoinnin ja korjattavaa pinta-alaa tulisi olla vähintään 50–300 ha vuodessa, jotta korjuu olisi kannattavaa. (Sihvonen, Leinonen & Villa 2013, 6.)

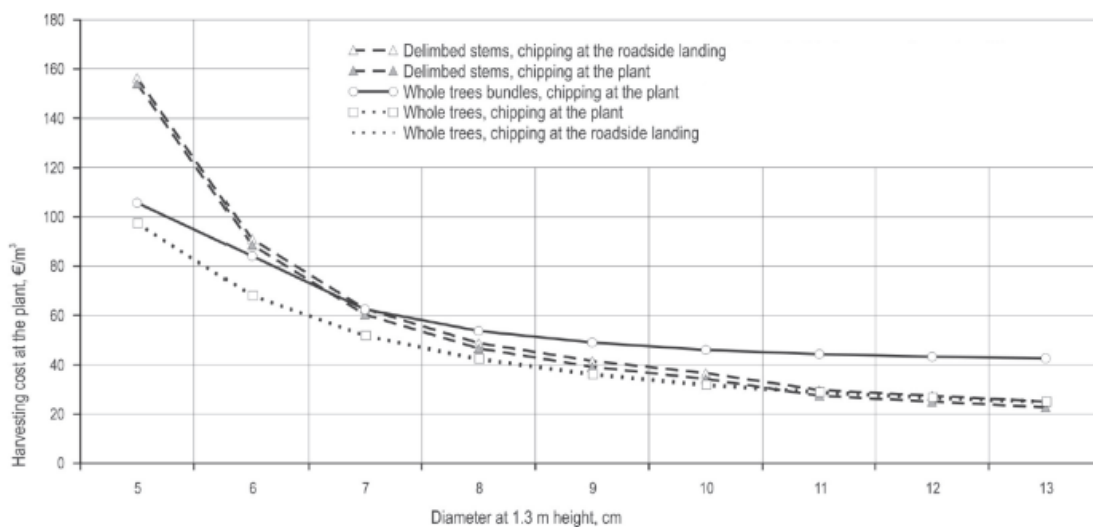
Taulukko 2. Eri koneketjujen tuottavuuksia, kustannuksia, etuja ja haittoja (Sihvonen ym. 2013, 30).

Kone tyyppi	Tuottavuus	Kustannus (raportoitu)	Kustannus laitoksella (€/MWh) <sup>1</sup>	Edut	Haitat
Hakeharvesteri (Bergström et al. 2011)	~30 t/työmaatunti	4,8 €/MWh tien varressa hakkeena	7,3	Suurilla aloilla edullinen	Vaatii suuret alat suurten investointikustannusten takia, koneiden määrä tuotantoketjussa, korjuu hakkeena
Tarkkuussilppuri (JF Maquinas Agricolas LTD)	5 t/h	12,7 €/MWh hakkeena tienvarsivarastolla	15,2	Halpa investointi	Työteho vaatimaton, korjuu hakkeena
Pajun kokopuuna korjaava kone (Stemster)	21 t/työmaatunti	7,0 €/MWh kokopuuna tienvarressa	11,75	Kokopuuna, helppo tuotantoketju	Investointi, erikoiskone jolla ei muuta käyttöä
Pyöräpaalit (BioBaler)	22 t <sub>ka</sub> /h	14,5 €/MWh käyttöpaikalla murskattuna	14,5	Monikäyttöinen (esim. tienvarsien raivaus)	Korjuu paaleina, eli pakko murskata ennen käyttöä
Harvesteri pyöriväteräisellä energiapuukouralla sekä lähikuljetus kuormatraktorilla	Hakkuu: 2,7 t <sub>ka</sub> /tehotunti Kuljetus: 8,4 t <sub>ka</sub> /tehotunti	10,2 €/MWh tienvarsivarastolla kokopuuna	14,95	Olemassa oleva konekanta, käyttöä pajunkorjuun ulkopuolella	Melko kallista
Kuormatraktori-pohjainen korjuri giljotiinikouralla	0,77 t <sub>ka</sub> /tehotunti	18,2 €/MWh tienvarsivarastolla kokopuuna	22,95	Olemassa oleva konekanta, muuta käyttöä	Hidas ja erittäin kallis
Miestyönä	31,7 h/ha (~1,54 k-m <sup>3</sup> /h)	8,1 €/MWh kaadettuna palstalla kokopuuna	15,95	Ei kiinteitä kuluja, helppo tuotantoketju	Hidasta, työvoiman saatavuus, kallista

Taulukosta 2 käy selväksi eri konetyyppien tärkeimmät tunnusluvut. Parhaimpaan tuottavuuteen yltää hakeharvesteri, ollessa samalla kustannustehokkain. Hakeharvesteri vaatii kuitenkin paljon pinta-alaa, koska investointi on kallis. Vartenotettavimmat vaihtoehdot olisivat mahdollisesti harvesteri pyöriväteräisellä energiapuukouralla tai kuormatraktori-pohjainen korjuri giljotiinikouralla. Näihin molempiin konetyyppeihin on olemassa oleva konekanta, jota voidaan myös hyödyntää energiapajun korjuukauden ulkopuolella. Taulukosta erityistä huomiota herättää siis kustannus laitoksella, €/MWh. Kustannus laitoksella antaa



arvon, jossa on huomioitu lähikuljetus 3,1 €/MWh, haketus välivarastolla 2,25 €/MWh ja kaukokuljetus 45 km 2,5 €/MWh. Tällöin voidaan oikeasti vertailla eri konetyyppejä keskenään.



Kuvio 4. Energiapuuharvennuksen korjuukustannus käyttöpaikalla suhteessa rinnankorkeusläpimittaan (Laitila & Väättäinen 2012, 207).

Kuviosta 4 käy selväksi rinnankorkeusläpimitan vaikutus käyttöpaikkakustannuksiin energiapuuharvennuksen korjuukustannuksien osalta. Samanlainen ilmiö on myös havaittavissa metsähaketta korjattaessa. Tutkimuksessa energiapaju on rajattu neljän metrin valtapituuteen ja siis kahden vuoden intensiivikasvatukseen. Tällöin ongelmaksi todennäköisesti osoittautuu energiapajun pieni rinnankorkeusläpimitta ja myös hehtaarikohtainen saanto. Kustannukset käyttöpaikoilla nuorilla energiapajuilla olisivat halvimmillaan 40,32 €/m<sup>3</sup> ja 19,2 €/MWh (Sihvonen ym. 2016, 48).

Taulukko 3. Pajun kuiva-tuoretiheys, kosteus- ja kuoriprosentti eri-ikäisillä ve-soilla talvella (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama, Korhonen 2016, 65).

Ikä vuosia	Kuiva-tuoretiheys, kg/m <sup>3</sup>	Kosteus, %	Kuori, %
1	284	64	34
2	356	57	22
4	360	57	13
5	382	56	11
2-3	295–408 kokopuu 299–437 puuaines		

Taulukosta 3 nähdään pajun kuiva-tuoretiheys, joka näyttää olevan 2 vuoden ikäisenä 356 kg/m<sup>3</sup>, kosteus olisi jopa 57 %, mutta on huomioitava, että kyseiset mittaukset on tehty talviaikana. Laskentaa varten energiapajun kokonaistiheydeksi voidaan olettaa 559 kg/m<sup>3</sup>. Energiapajun korjuu ja haketus sellaisenaan johtaa siis suhteellisen korkeaan kosteusprosenttiin. Energiatiheys tällaisella pajuhakkeella on alhainen, vain 0,3–0,4 MWh/i-m<sup>3</sup> (liite 3). Korjuukustannukset lasketaan Pajupoikien tuottamalla kannattavuuslaskurilla, jolloin energiapajun korjuulle saadaan arvo €/MWh. Laskentamallin antamia tietoja käytetään myös nettonykyarvon laskennassa.

## 4 Tutkimusongelma

Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus tutkia voimajohtoaukeiden hyödyntämistä metsätalouden näkökulmasta. Voimajohtoaukeita raivataan kuuden vuoden välein ja raivattavaa metsämaata on 6 000 hehtaaria. Tutkimuksen taustalla on kiinnostus tutkia, voidaanko näitä joutomaiksi leimattuja metsämaita hyödyntää mitenkään. Tutkimuksessa huomioidaan Fingrid Oyj:n antamat työturvallisuusohjeet.

Tutkimusongelmana on vain yksi kysymys, johon tässä opinnäytetyössä pyritään vastaamaan:

- Millaisia hyödyntämismahdollisuuksia Kymenlaakson maakunnan voimajohtoukeilla on metsätalouden näkökulmasta?

Tutkimukseen voidaan myös laatia tarkentava kysymys:

- Mikä kasvatusketju olisi mielekkäin metsätalouden näkökulmasta?

## **5 Aineisto ja menetelmät**

Olenaiset tekijät metsäbiomassan laskentaan ovat voimajohtoukeiden metsämaata varaava määrä hehtaareissa Kymenlaakson maakunnan alueella ja Kymenlaakson maakunnan kasvupaikkajakaumat. Laskennassa oletetaan kasvupaikkajakauman noudattavan samaa jakaumaa myös metsämailla, jotka ovat voimajohtoukeilla. Voimajohtoukeiden metsämaata varaava määrä hehtaareissa mitattiin Fingrid Oyj:n omassa karttapalvelussa, josta pystyttiin määrittämään, onko voimajohto metsämaalla.

### **5.1 Aineiston hankinta**

Metsäkeskus kerää metsävaratietoa kaukokartoituksen avulla. Keruujärjestelmä perustuu ilmakuvaukseen, koealamittauksiin, laserkeilaukseen ja kohdennettuun maastoinventointiin. Metsävaratieto kattaa vain yksityismetsät ja ilmakuvaukset puolestaan n. 6–7 kilometrin korkeudelta. Laserkeilauksella saadaan tarkkaa tietoa tehokkaasti mm. puuston ja maaston rakenteesta. Ilmakuvia hyödynnetään puulajien tunnistamisessa. Laserkeilaukset tehdään lentokoneesta käsin muutaman kilometrin korkeudella. Inventoitavaa yksityismetsää vuosittain on 1,5 miljoonaa hehtaaria, jolloin inventointikierto on kymmenen vuotta. Kaukokartoitusperusteisen metsävaratiedon keruu kestää n. vuoden. (Metsäkeskus 2017.)

Kymenlaakson maakunnan kasvupaikkajakaumat laadittiin Metsäkeskukselta ilmoitettuna hehtaarimääräisesti. Tietoja käytettiin biomassan mittaukseen ja myöhemmin nettotuottojen nykyarvon laskentaan. Tarkoilla tiedoilla päästiin myös luotettavaan tuloksiin. Kasvupaikkajakaumat ovat metsäkeskuksen yksityismetsien kunnittaisista metsävaratiedoista johdettuja arvoja, jotka ovat luonteestaan huolimatta yleistä tietoa, ja ne julkaistaan myöhemmin metsäkeskuksen internetsivuilla. Kyseiset tiedot ovat päivitetty tammikuussa 2017.

## **5.2 Taimikoiden simulaatio**

MOTTI-ohjelmisto on luonnonvarakeskuksen tarjoama työkalu metsänkasvatuksen tueksi, jolla voidaan tuottaa tuloksia metsänkasvatuksen vaihtoehtojen vertailuun. Ohjelmistoon on tiivistetty metsäntutkimuksen tieteellistä pääomaa, joita ovat esimerkiksi vuosikymmenien aikana kerättyjä maastomittausaineistoja. (Luonnonvarakeskus 2017.) Käytetty MOTTI-ohjelmisto tässä tutkimuksessa oli v. 3.3 (5.2.2015).

MOTTI-ohjelmistolla simuloitiin männyn, kuusen ja rauduskoivun taimikonkehitystä siihen pisteeseen, kunnes simuloitavan taimikon valtapituus oli työturvallisuusohjeiden rajalla. Taimikoiden kehitys jaettiin kahteen tarkasteltavaan kasvatusketjuun puolajaittain. Vaikuttavin tekijä kasvatusketjun valintaan oli työturvallisuusohjeiden määrittelemä yleistys siitä, kuinka pitkää puustoa saadaan kasvattaa voimajohtoauekiden alla. Taimikoita saatiin siis kasvattaa korkeintaan neljä metriä pitkiksi. Taimikoille simuloitiin varhaisperkuullinen kasvatusketju, kasvatusketju jossa varhaisperkausta ei suoriteta.

Taimikoiden tilavuuden laskenta MOTTI-ohjelmistolla kuitenkin osoittautui hankalaksi. MOTTI-ohjelmisto ei antanut nuorille taimikoille tilavuutta, mutta ohjelmisto kuitenkin simuloi taimikolle valtapituuden ja keskiläpimitan. Keskiläpimitan ja valtapituuden mukaan manuaalisestikaan taimikoille ei voitu laskea tilavuutta, koska Laasasenahon kaavoissa (liite 1) käytetään keskiläpimittaa ja keskipituutta. Valtapituutta käytettäessä tulos olisi johtanut entistä suurempaan keskivirheeseen.

Valtapiuudeltaan neljämetrisen taimikon simulointi osoittautui siis ongelmalliseksi tutkimustyön simulaatiovaiheessa. Tutkimus jatkui kuitenkin taimikoiden osalta perehtymällä empiiriseen metsäsuunnitteluaineistoon, Karelia-AMK:n omaan dataan metsiköistä, jotka ovat Tapio Forest Kit -tietokannassa. Tätä dataa käydessä läpi kuivahkojen männiköiden osalta pystyttiin asettamaan oletta-  
mus: Kuivien ja kuivahkoiden kankaiden männiköissä, joissa runkoluku on n. 3 000 runkoa hehtaarilla ja valtapiuus noin neljä metriä, saadaan päätehakkuussa poistumaa n.  $10\text{m}^3 \pm 2 \text{m}^3/\text{ha}$ . Koska kasvupaikaltaan kuivilla ja kuivahkoilla kankailla kasvatettaisiin männikköä, niin rehevimmillä kasvupaikoilla kasvatettaisiin puolestaan energiapajua korkeintaan nelimetriseksi.

Toisessa simulaatiossa MOTTI-ohjelmistolla simuloitiin yleisille puulajeille kasvatusketjut, joissa valtapiuus olisi korkeintaan kahdeksan metriä. Simulaatioissa tarkasteltiin kolmea (3) erilaista kasvatusketjua. Ensimmäisessä (1) kasvatusketjussa ei suoritettu minkäänlaisia hoitotoimenpiteistä. Toisessa (2) kasvatusketjussa puustolle suoritettiin varhaisperkaus 5 vuoden iässä. Kolmannessa (3) kasvatusketjussa puustolle suoritettiin varhaisperkaus 5 vuoden iässä ja taimikonharvennus valtapiuuden ollessa neljä metriä. Kahdeksan metrin valtapiuuden simulointi perustui siihen, että vasta tällä valtapiuudella MOTTI-ohjelmisto antaa kasvatettavalle puustolle tilavuuden ja muita tarkasteltavia tunnuslukuja. Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin tilavuuden lisäksi ikää, jolloin puusto on hakkuukypsä että myös lehti- ja neulasbiomassaa, joka saatiin päätehakkuussa. Kannattavuuden huomiointia varten tarkasteltiin myös puuston keskiläpimittaa. Tällä kahdeksan metrin puuston valtapiuudella on todennäköistä, että toimenpiteiden suorittaminen turvallisesti voimajohtojen alla voisi olla tietyissä olosuhteissa mahdollista, noudattaen kuitenkin suurta varovaisuutta.

### **5.3 Määrällinen tutkimus**

Tässä opinnäytetyössä käytettiin määrällistä eli kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. Koska tutkimustyössä käytettiin MOTTI-ohjelmistoa taimikoiden ja puuston simulointiin, ja MOTTI-ohjelmisto perustuu aiempaan laajaan ja pitkältä ajalta kerättyyn tutkimusdataan, on kyseessä määrällinen tutkimus. Tutkimus perustui siis olemassa oleviin teorioihin ja pyrki yleistämiseen tutkimustuloksen otosta apuna käyttäen. MOTTI-ohjelmistossa simuloitiin kasvupaikka- ja puulajikohtaisesti yhden hehtaarin taimikko tai puusto, jonka tilavuus yleistettiin puulaji- ja kasvupaikkakohtaisesti koko Kymenlaakson maakunnan mittakaavaan. Tällöin tutkimuksessa on otoksia, jotka yleistetään.

## **6 Tulokset**

Tulokset on jaettu kahteen eri osioon ja ne perustuvat puuston valtapituuteen. Syy tälle on tulosten visuaalinen selkeys ja se, ettei MOTTI-ohjelmistolla pystytä simuloimaan valtapituudeltaan neljän metrin pituista taimikkoa. Tuloksissa ilmenee myös eri kasvatusketjujen luonne eri kasvupaikoilla ja puulajeilla. Ensimmäisessä (1) kasvatusketjussa puustolle ei toteutettu minkäänlaisia hoitotoimenpiteitä. Toisessa (2) kasvatusketjussa puustolle toteutettiin vain taimikon varhaisperkaus n. 5 vuoden iässä. Kolmannessa (3) kasvatusketjussa puustolle toteutettiin taimikon varhaisperkaus n. 5 vuoden iässä ja myöhemmin taimikon harvennus noin neljän metrin valtapituudessa.

### **6.1 Puuston valtapituus 4 metriä**

MOTTI-ohjelmistolla ongelmalliseksi osoittautui neljän metrin taimikon simulointi, koska ohjelmisto ei antanut näin lyhyelle taimikolle tarkasteltavia tunnuslukuja. Tutkimuksellisesti tarkasteltiin Karelia-AMK:n omaa Tapio Forest Kit -

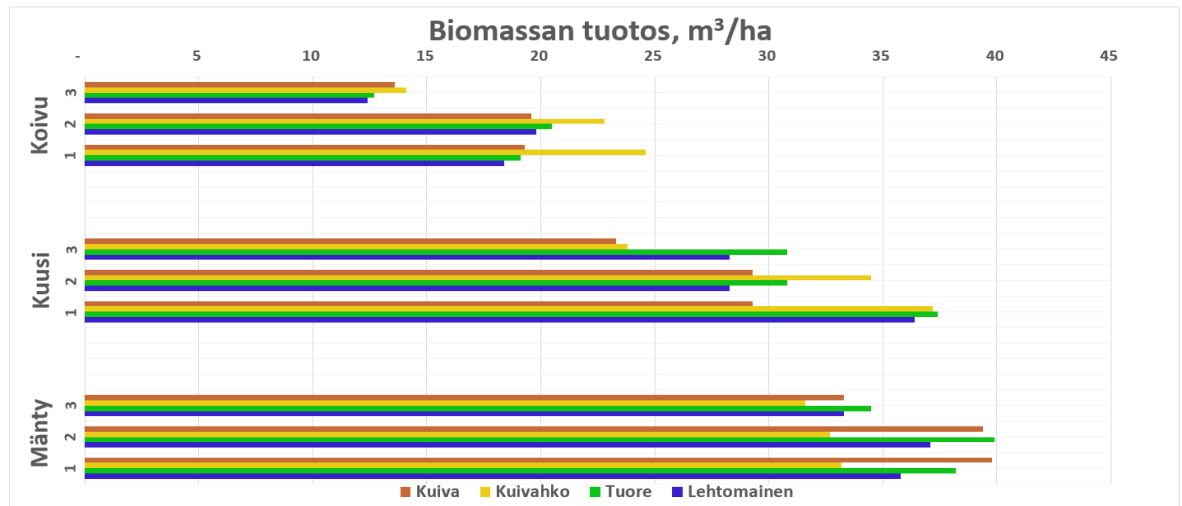
tietokantaa, josta pystyttiin oletamaan männikön tilavuus tietyllä iällä ja keskipituudella. Muita kiinnostavia tunnuslukuja ei voitu tarkastella, esimerkiksi keskilämpimittaa tai lehti- ja neulasbiomassaa.

Olettamuksen mukaan kuivien ja kuivahkoiden kankaiden männiköissä, joissa runkoluku on n. 3 000 runkoa hehtaarilla ja valtapituus noin neljä metriä, saatiin päätehakkuussa poistumaa n.  $10 \text{ m}^3 \pm 2 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Valtapituuden rajoituksessa neljään metriin, voitaisiin mahdollisesti rehevillä kasvupaikoilla kasvattaa energiapajua lyhyellä, intensiivisellä kierrolla. Energiapajulle saatiin 14–16 kiintokuution vuotuinen tuotto hehtaarille. Tällöin energiapajun saanto korjuussa oli n. 28–32  $\text{m}^3/\text{ha}$ .

## **6.2 Puuston valtapituus 8 metriä**

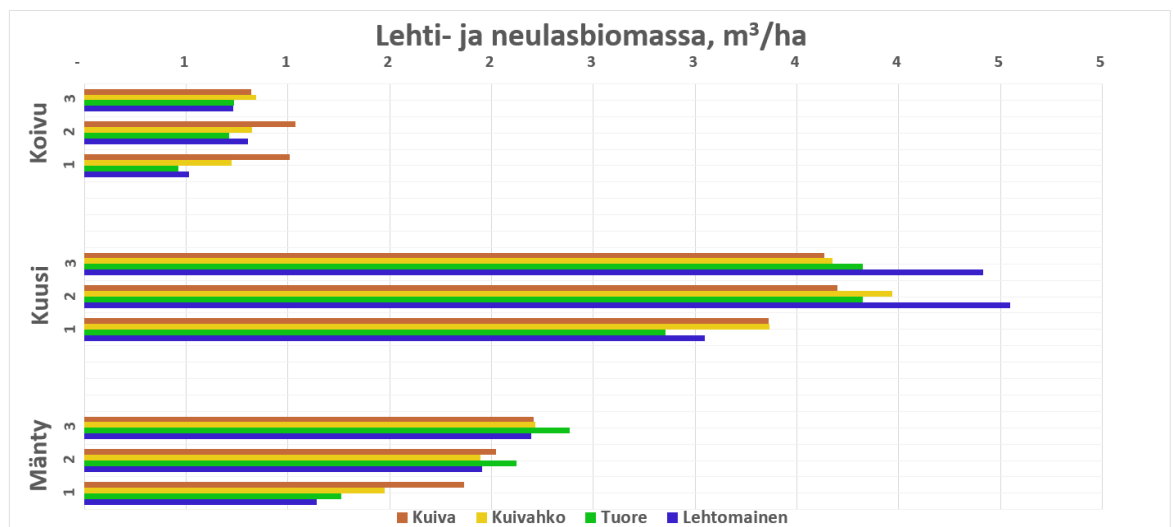
MOTTI-ohjelmistossa simuloitiin yleisille puulajeille kahdeksan metrin pituinen puusto kasvupaikkojen ja kasvatuksetjujen mukaan. Ensimmäisessä (1) kasvatuksetjussa ei suoritettu minkäänlaisia hoitotoimenpiteitä. Toisessa (2) kasvatuksetjussa taimikolle suoritettiin varhaisperkaus, muttei taimikonhoitoa. Kolmannessa (3) kasvatuksetjussa taimikolle suoritettiin varhaisperkaus ja myöhemmin neljän metrin valtapituudessa taimikonhoito. Varhaisperkaus ja taimikonhoito suoritettiin metsänhoidon suositusten mukaisesti. Kuviot, joissa esiintyy mänty, kuusi ja koivu, mänty on uudistettu istuttaen. Männyn uudistamista istuttaen ja luontaisesti vertaillaan myöhemmissä kuvioissa.

## 6.2.1 Simulaatiotulokset yleisille puulajeille



Kuvio 5. Biomassan tuotokset yleisille puulajeille kasvupaikan ja kasvatusketjun mukaan.

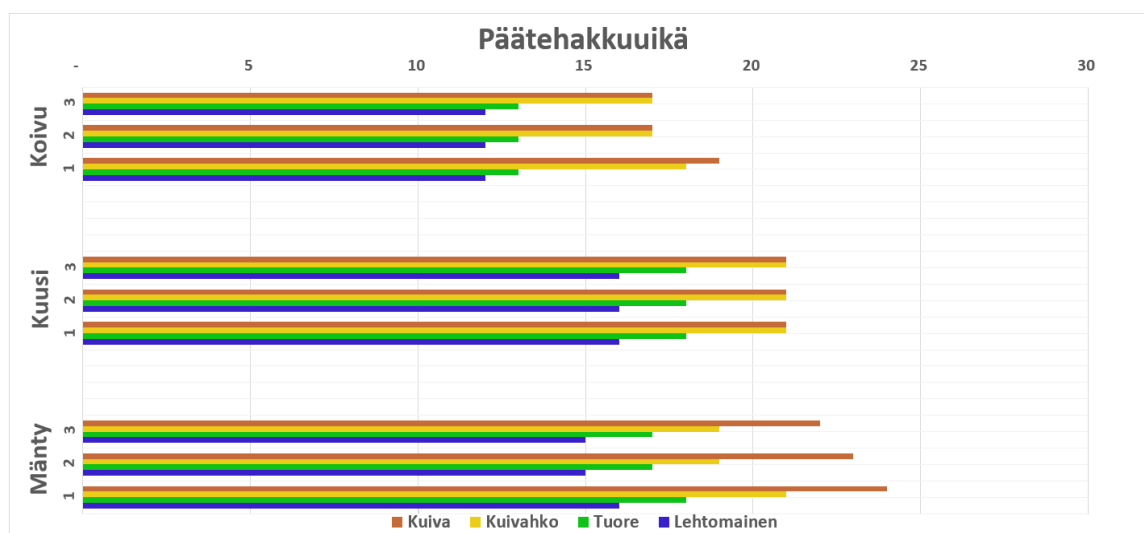
Kuviosta 5 käy selville, että mänty on selvästi koivua mielekkäämpi vaihtoehto kasvatettaessa voimajohtaukeilla. Kuusi tuottaa hiukan enemmän biomassaa rehevillä kasvualustoilla, mikäli noudatetaan 1. kasvatusketjua, jossa ei puustoa hoideta ollenkaan. Mänty yltää yleisesti parhaimpiin simulaatiotuloksiin biomassan hehtaarikohtaisen tuotoksen osalta.



Kuvio 6. Lehti- ja neulasbiomassan tuotos yleisille puulajeille kasvupaikan ja kasvatusketjun mukaan.

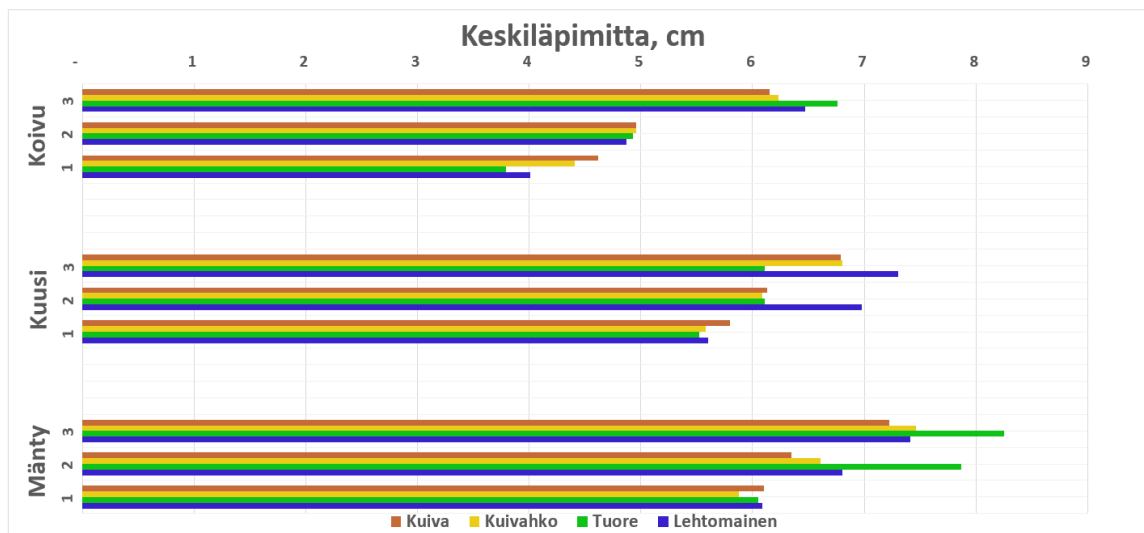


Kuviosta 6 käy selville, että kuusen neulasbiomassa hehtaaria kohden on selkeästi suurempi kuin muilla puulajeilla. Koivun hehtaariohtainen lehtibiomassa näyttäisi olevan kaikista pienin. Koivun hehtaariohtainen biomassantuotos on kuitenkin mäntyyn verraten huonompi. Lehti- ja neulasbiomassan osalta metsiköt, jotka ovat uudistettuja männyille, näyttäisi olevan tässä suhteessa paras vaihtoehto, koska biomassan tuotos pysyy parhaana eikä lehti- ja neulasbiomassaa tule kuin n. 6,25 % kokonaisbiomassasta.



Kuvio 7. Päätehakkuiät yleisille puulajeille kasvupaikan ja kasvatusketjun mukaan.

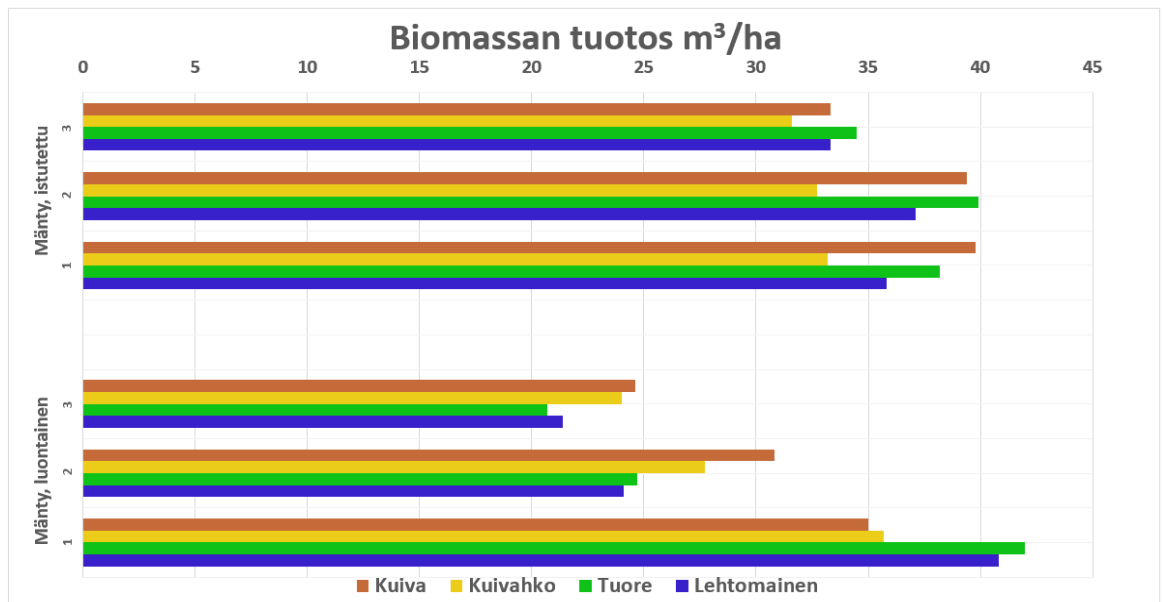
Kuviosta 7 käy selville päätehakkuiät, ja koivun päätehakkuiä on kaikista pienin, mikä tekee koivun kasvatuksesta tässä kaikista nopeinta. Oletettavaa oli koivun pieni päätehakkuiä, koska koivut yleensä kasvavat pituutta suhteellisen voimakkaasti. Männyn ja kuusen päätehakkuiät ovat suhteessa samaa luokkaa.



Kuvio 8. Keskiläpimitat yleisille puulajeille kasvupaikan ja kasvatusketjun mukaan.

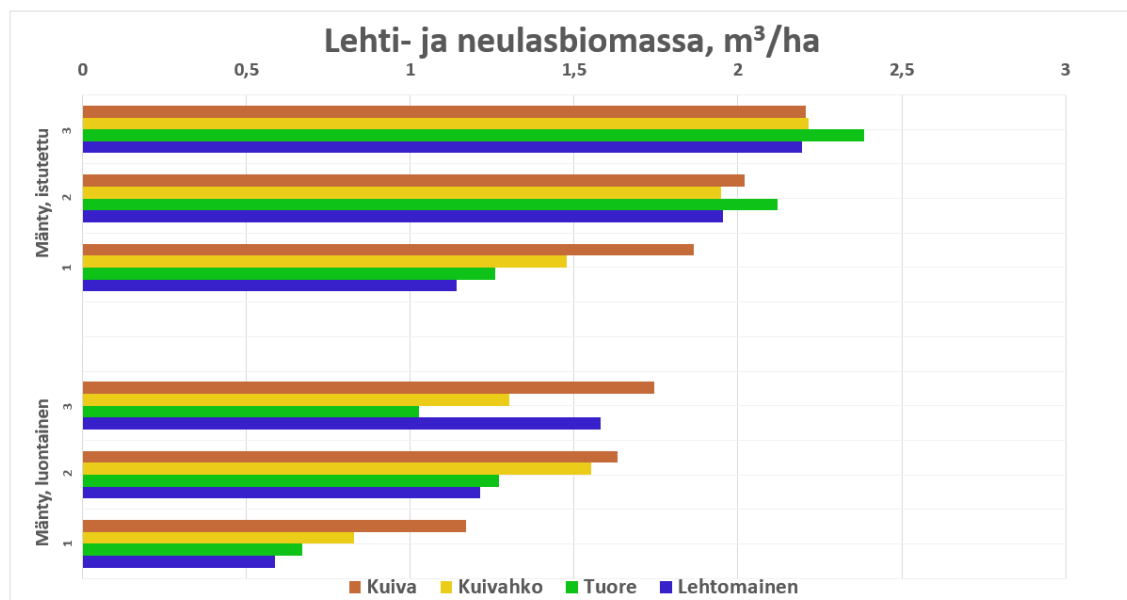
Kuviosta 8 käy selville männyn yltävän suurimpaan keskiläpimittaan, jota kasvatetaan metsänhoidon suositusten mukaisesti. Metsänhoidon suositukset juurikin perustuvat laatu puun kasvatukseen. Noudattamalla metsänhoidon suosituksia, voidaan olettaa keskiläpimitan olevan mahdollisen suuri. Mänty näyttäisi yltävän melkein kaikilla kasvualustoilla ja millä tahansa kasvatusketjulla melkein kuuden senttimetrin läpimittaan, mikä tekee siitä parhaimman vaihtoehdon kasvatukseen.

## 6.2.2 Männyn uudistamistapojen vertailu



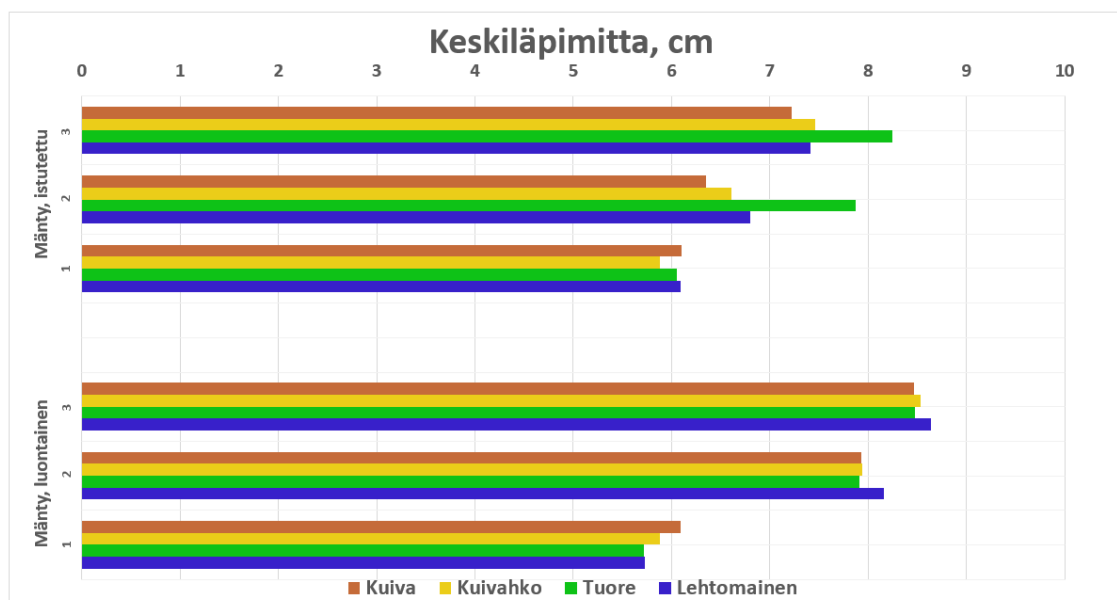
Kuvio 9. Männyn uudistaminen luontaisesti ja istuttaen, biomassan tuotokselle kasvupaikan ja kasvatusketjun mukaan.

Kuviosta 9 käy selville istutusmännikön olevan kauttaaltaan mielekkäämpi vaihtoehto kuin luontaisesti perustetun männikön. Tuoreella ja lehtomaisella kasvualustalla luontaisesti perustettu männikkö kuitenkin yltää parhaimpaan biomassan tuotokseen, kuitenkin kasvatusketjulla, jossa metsikköä ei hoideta.



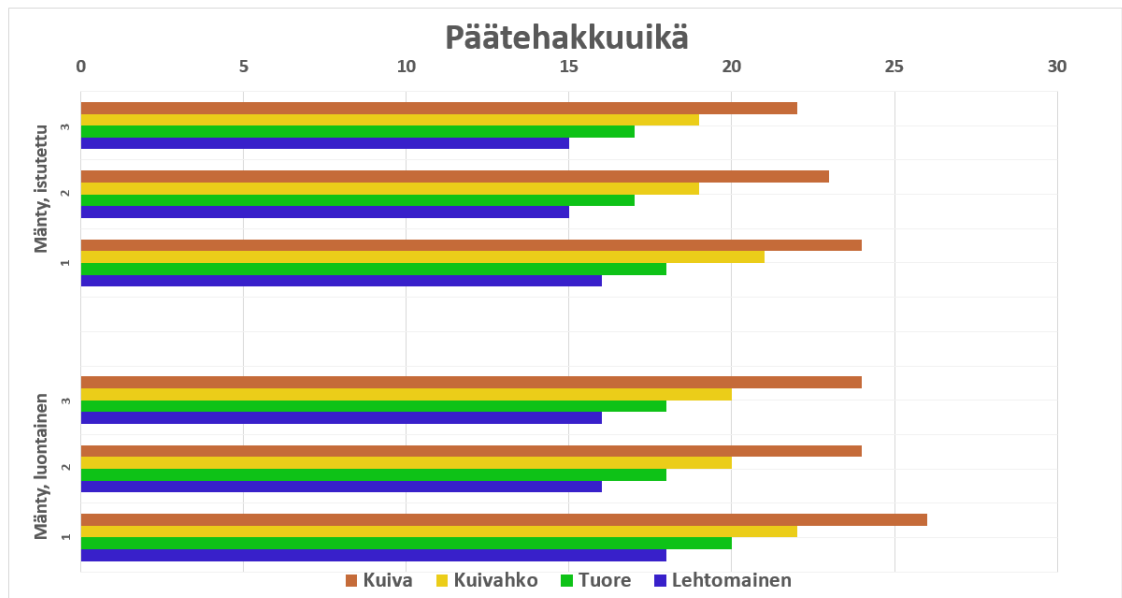
Kuvio 10. Männyn uudistaminen luontaisesti ja istuttaen, lehti- ja neulasbiomassalle kasvupaikan ja kasvatusketjun mukaan.

Kuviosta 10 käy selville, että luontaisesti uudistetulla männiköllä nähdään olevan pienin lehti- ja neulasbiomassan osuus, mikä voidaan selittää männikön kasvutiheydellä. Hoitamattomassa metsikössä lehti- ja neulasbiomassaa on paljon vähemmän kuin metsänhoidon suositusten mukaisessa, hoidetussa metsikössä.



Kuvio 11. Männyn uudistaminen luontaisesti ja istuttaen, keskiläpimitalle kasvupaikan ja kasvatusketjun mukaan.

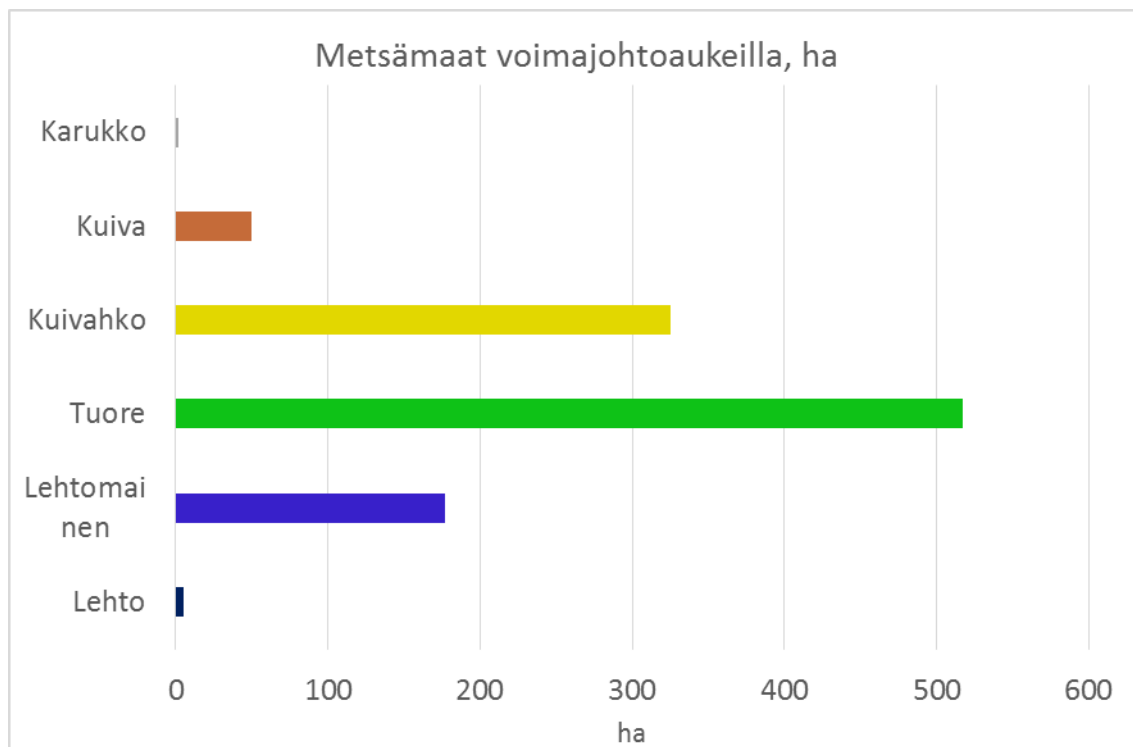
Kuviosta 11 käy selville, että keskiläpimitan osalta luontaisesti uudistettu männikkö näyttää yltävän melkein kaikilla kasvualustoilla ja kasvatusketjuilla kuuden senttimetrin läpimittaluokkaan, kun parhaimmillaan luontaisesti hyvin hoidetussa metsikössä päästään jopa 8,5 senttimetrin läpimittaluokkaan. Istutetussa männikössä vain tuoreella kasvualustalla päästään yli 8 senttimetrin läpimittaluokkaan.



Kuvio 12. Männyn uudistaminen luontaisesti ja istuttaen, päätehakkuuikä kasvupaikan ja kasvatusketjun mukaan.

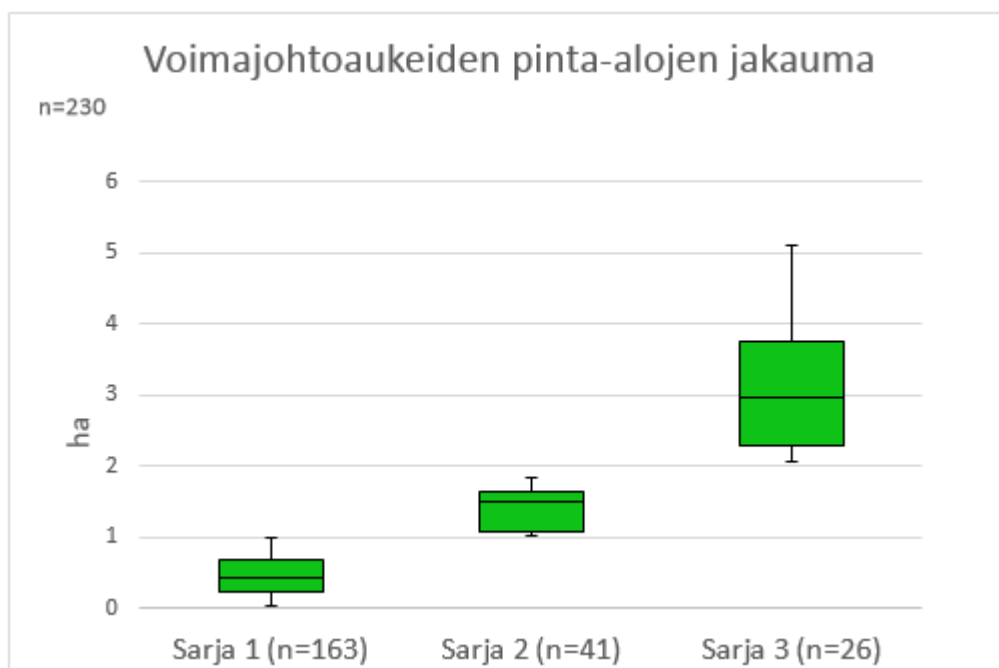
Kuviosta 12 käy selville, että päätehakkuuikä on suhteellisen sama, huolimatta siitä, onko männikkö perustettu istuttaen vai luontaisesti. Hoitamattomassa metsikössä päätehakkuuikä, ja samalla kiertoaika, on selvästi suurempi.

### 6.3 Voimajohtoaukeat Kymenlaakson alueella



Kuvio 13. Metsämaat voimajohtoaukeilla Kymenlaakson maakunnan alueella.

Kuviosta 13 nähdään metsämaiden jakautuminen voimajohtoaukeille kasvupaikkajakauman mukaisesti (liite 2). Kymenlaakson maakunnan alueella kasvupaikkoihin kuului kuivan, kuivahkon, tuoreen ja lehtomaisen lisäksi myös lehdot ja karukot. Lehtojen osuus kasvupaikkajakaumassa on 0,5 % ja karukoita on 0,2 %. Näiden summa vähennetään Kymenlaakson maakunnan voimajohtojen metsämaa-alasta, jolloin käyttökelpoista metsämaata jää jäljelle yhteensä 1 077 hehtaaria.

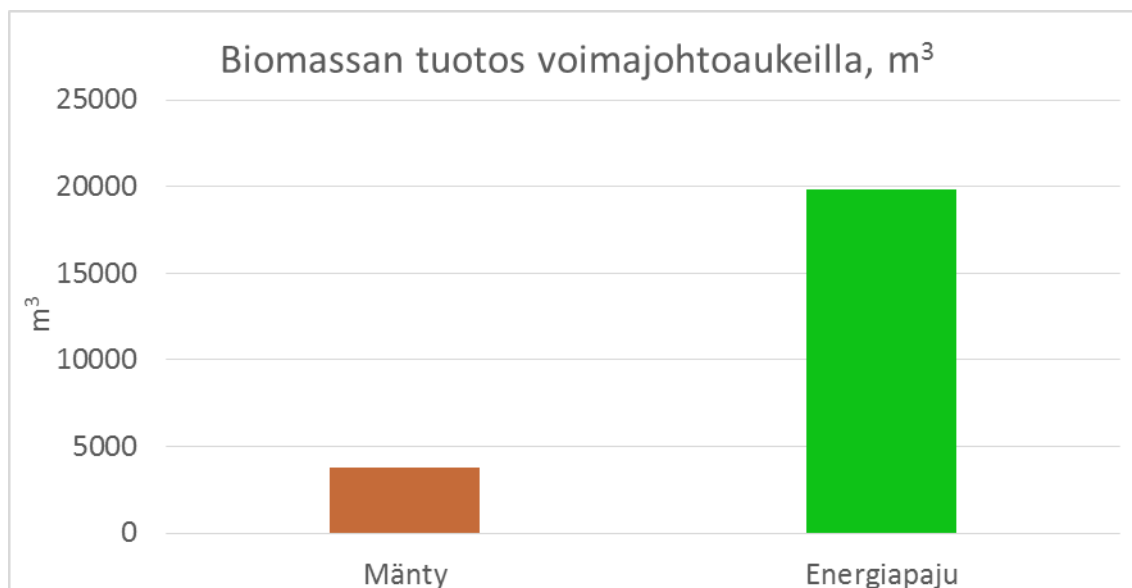


Kuvio 14. Ruutu- ja janakaavio Kymenlaakson maakunnan alueen metsämaalla sijaitsevien voimajohtoaukeiden pinta-alojen jakauma ja lukumäärä (n = 230).

Kaaviosta 14 käy selville voimajohtoaukeiden pinta-alojen jakautuminen. Ruudun alareuna vastaa alaneljänneistä ja yläreuna puolestaan yläneljänneistä. Ruudun sisällä oleva vaakaviiva kuvastaa mediaania. Janojen päissä nähdään vaakaviivat joista alempi kuvastaa pienintä arvoa, kun ylempi kuvastaa suurinta arvoa. Sarja 1 kuvastaa pinta-aloja, joiden koko on 0–0,99 hehtaaria. Sarja 2 kuvastaa pinta-aloja, joiden koko on 1,00–1,99 hehtaaria. Sarja 3:n sisältyy tässä useampi luku, koska mitattaessa Kymenlaakson maakunnan voimajohtoaukeita ilmeni, ettei yli 2 hehtaarin aloja ole paljoa. On siis järkevää skaalata Sarja 3 2,00–5,99 hehtaarin kokoon, jolloin kuvioista 6 saadaan selkeää. Havaintoja tässä on yhteensä 230 kappaletta, jolloin kyseessä on myös määrällinen mitaus, jonka kuvioksi soveltuu ruutu- ja janakaavio.

## 6.4 Simulaatiotulokset suhteutettuna voimajohtoaukeille

### 6.4.1 Mänty ja energiapaju



Kuvio 15. Biomassan tuotokset männylle ja energiapajulle.

Kuviosta 15 käy selville selkeä ero energiapajun ja männikön biomassan tuotoksessa. Energiapajulle on kuitenkin varattu ravinteikkaat kasvutilat, joita on myös suhteessa enemmän kuin männyn kuivahkoita tai kuivia kasvutiloja.

Voimajohtoaukeita metsämaalla Kymenlaakson maakunnan alueella kulkee yhteensä 1 106 hehtaaria. Lehtoja ja karukoita ei lasketa mukaan, joten käytettäväksi metsämaaksi jää mahdollisesti jopa 1 077 hehtaaria. Neljän metrin kasvatusohjelmassa männylle varataan kuivat ja kuivahkot kasvualueet, kun energiapajulle varataan tuoret ja lehtomaiset kasvualueet. Metsämaa jakautuu siten, että männylle varataan 376 hehtaaria kasvualueita ja energiapajulle 687 hehtaaria kasvualueita. Mänty pystyy tuottamaan kasvualueillaan yhteensä 3760 m<sup>3</sup> biomassaa ja energiapaju yhteensä 19 585 m<sup>3</sup> biomassaa.

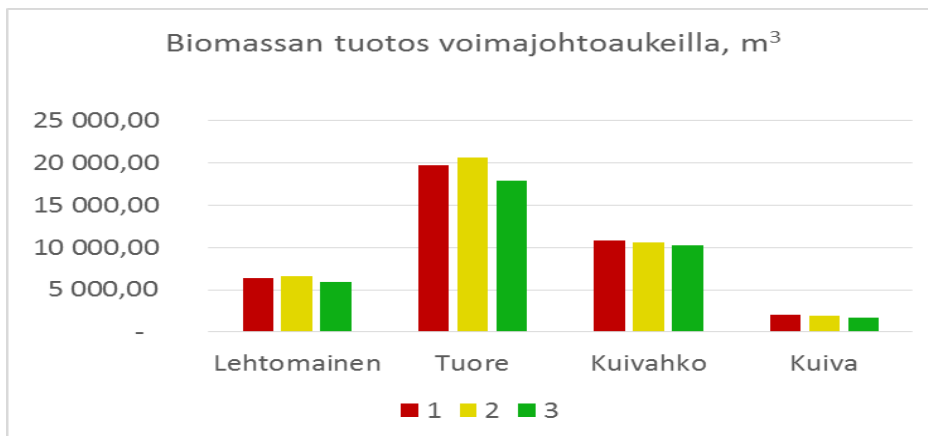
Kokonaisbiomassan tuotoksessa on huomioitava energiapajun nopea viljelykierto, intensiivikasvatuksessa energiapajun kierto on vain 2 vuotta, jolloin saanto on n. 28 m<sup>3</sup>/ha. Mänty tuottaa yhteensä 3 760 m<sup>3</sup> ja kiertoon menee 10



vuotta. Tässä ajassa energiapajulle on suoritettu viisi kiertoa, eli energiapajun biomassan tuotos kahta vuotta kohden voidaan viisinkertaistaa. Tällöin energiapajun biomassan tuotos on yhteensä jopa 99 291 m<sup>3</sup>. Yhteensä Kymenlaakson voimajohtoaukeilta voitaisiin kymmenen vuoden, tai yhden kokonaiskiertoajan aikana, kerätä biomassaa jopa 103 051 m<sup>3</sup>. Tällöin keskimääräinen vuotuinen biomassan tuotos olisi 10 305 m<sup>3</sup> koko Kymenlaakson maakunnan alueella kasvattaessa.

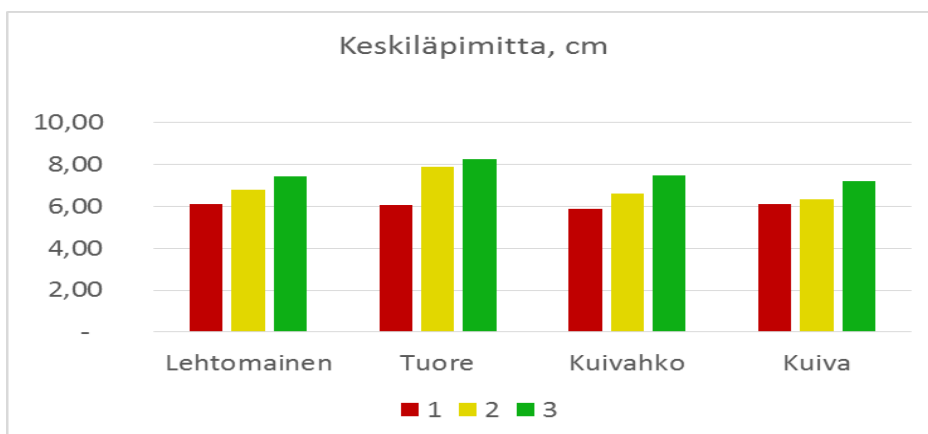
#### **6.4.2 Mielekkäin puulaji**

Simulaatiotulosten kuvioista käy selville, mikä olisi mahdollisesti paras vaihtoehto voimajohtoaukeiden uudistamiseen. Vaikuttaisi siltä, että mänty olisi mahdollisesti paras vaihtoehto yleisistä puulajeista voimajohtoaukeiden uudistamiseen, mikäli voidaan käyttää kahdeksan metrin valtapituutta. Tässä kappaleessa tarkastellaan männyn tunnuslukuja suhteutettuna Kymenlaakson maakunnan voimajohtoaukeille. Istuttaen uudistetun männikön simulaatiotulokset näyttävät olevan paremmat kuin luontaisesti perustetun männikön. Ensimmäisessä (1) kasvatusketjussa puustolle ei toteutettu minkäänlaisia hoitotoimenpiteitä. Toisessa (2) kasvatusketjussa puustolle toteutettiin vain taimikon varhaisperkaus n. 5 vuoden iässä. Kolmannessa (3) kasvatusketjussa puustolle toteutettiin taimikon varhaisperkaus n. 5 vuoden iässä ja myöhemmin taimikon harvennus noin neljän metrin valtapituudessa.



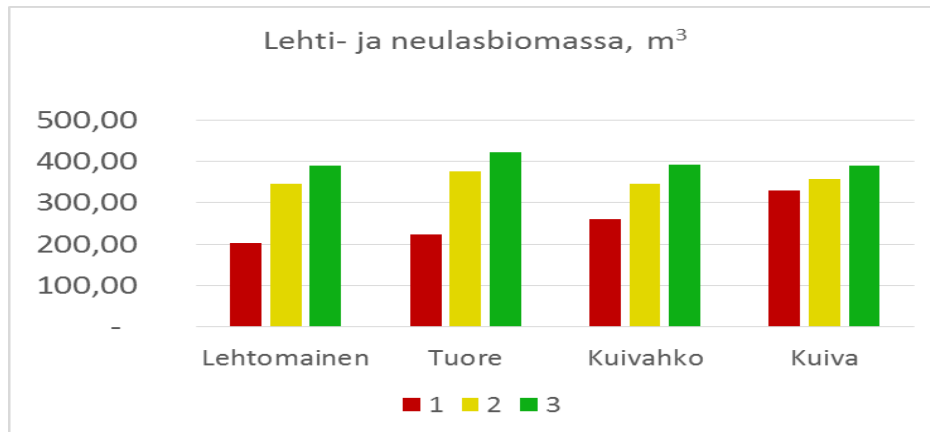
Kuvio 16. Istutetun männikön biomassan tuotos kuutiometreissä voimajohtoaukeilla.

Kuviosta 16 käy selville, että kasvatusketjujen vaikutus biomassan tuotokseen voimajohtoaukeilla eri kasvupaikoilla. Kasvupaikkojen välinen vertailu ei ole tässä tarpeen koska kasvupaikkoja on eri määrä, jolloin niitä ei voitaisi tässä verrata. Tärkeämpää on verrata eri kasvatusketjuja.



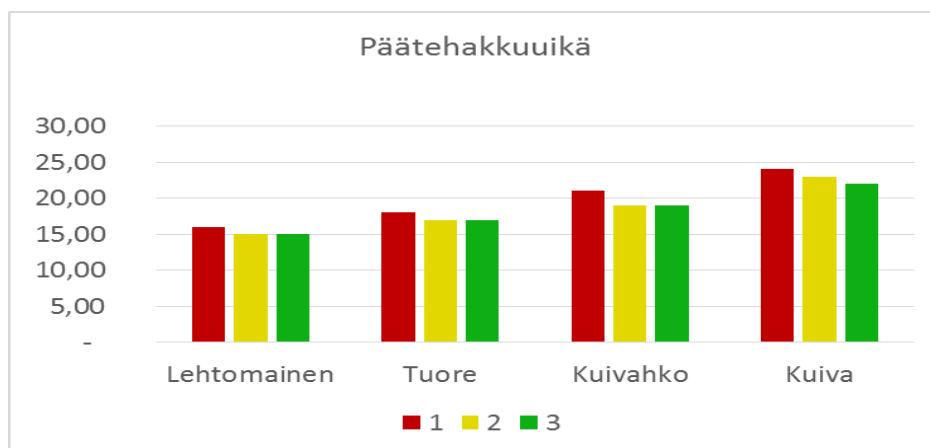
Kuvio 17. Istutetun männikön keskiläpimitta senttimetreissä.

Kuviosta 17 käy selville jo aiemmin todettu ilmiö. Metsänhoidon suosituksia noudattamalla päästään parhaimpaan keskiläpimittaluokkaan. Parhaimmillaan metsänhoidon suosituksia noudattaen päästään jopa kahden senttimetrin eroon.



Kuvio 18. Istutetun männikön lehti- ja neulasbiomassan tuotos kuutiometreissä voimajohtoaukeilla.

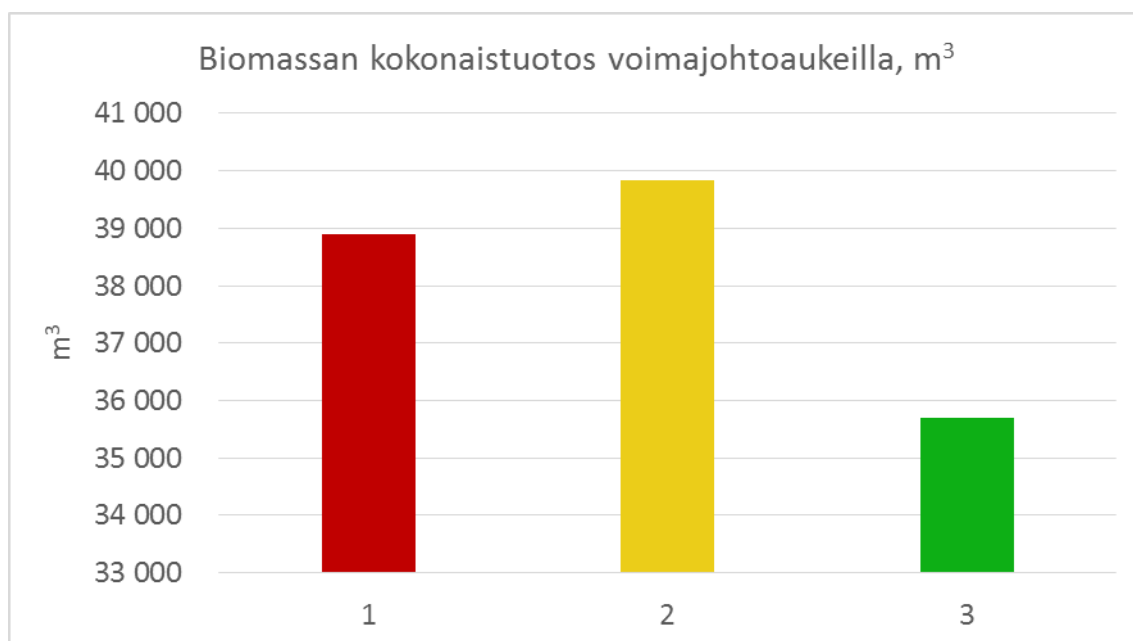
Kuviosta 18 käy selville, että lehti- ja neulasbiomassa on selkeästi suurempi hoidetuissa metsiköissä. Tämä selittyy sillä, että kasvatettavilla puilla on enemmän kasvutilaa. Tiheästi kasvavassa metsikössä puilla on vähemmän kasvutilaa, jolloin juurikin latvukset ovat pienempiä ja siten neulasmassakin on vähäisempää.



Kuvio 19. Istutetun männikön päätehakuikä voimajohtoaukeilla.

Kuviosta 19 käy selville, kuinka kasvatusketju vaikuttaa päätehakuikaan, kyse on loppujenlopuksi kuitenkin muutamista vuosista. Hoitamattomissa metsiköissä päätehakuikä on suurempi, eli itse kiertoaika on pidempi. Koska kyse on vain yhdestä tai kahdesta vuodesta, ei päätehakuikä ole simulaatiotulosten mukaisesti kriittinen tekijä.

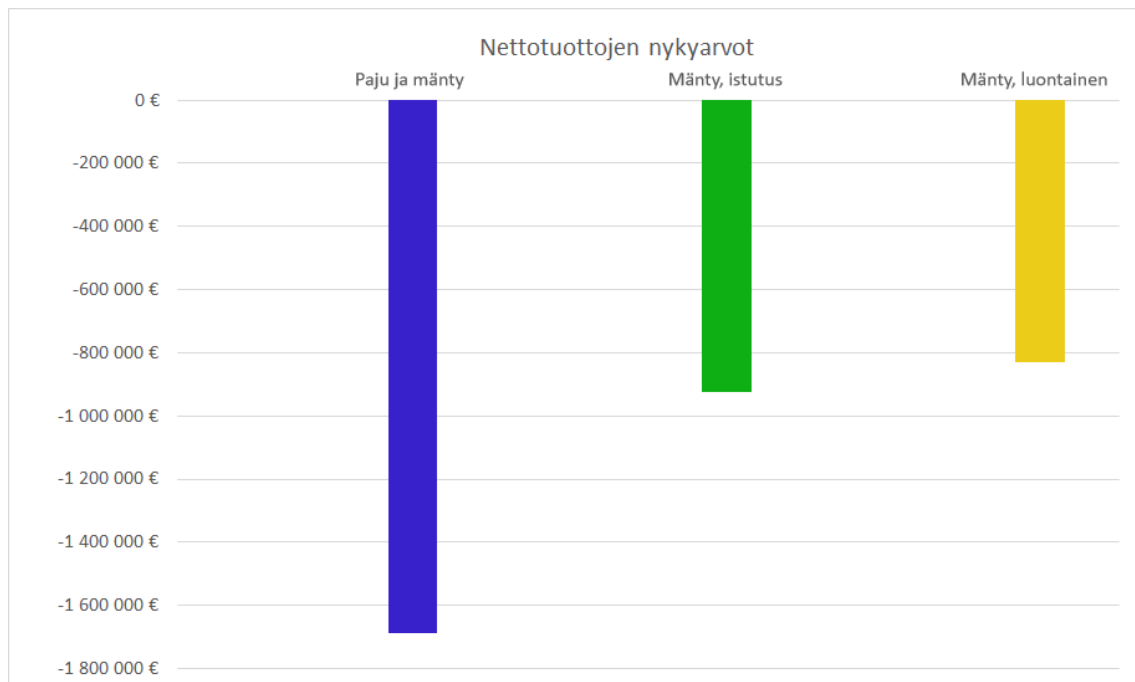
Kahdeksan metrin kasvatusohjelma voitaisiin mahdollisesti toteuttaa kasvattamalla pelkästään mäntymetsikköä istuttamalla. Luontaisesti uudistetussa mäntymetsikössä, noudattaen kahdeksan metrin valtapituutta, ei päästä samanlaisiin biomassan tuotoksiin kuin istuttaen. Simulaatiotuloksista kuitenkin voidaan tulkita, että luontaisesti uudistettu mäntymetsikkö, jota ei hoideta millään tavalla, kantaa biomassaa suhteellisen paljon jopa verrattaessa istutettuun männikköön. Istutetussa mäntymetsässä kiertoaika vaihtelee 15 ja 24 vuoden välillä, riippuen siis kasvupaikasta ja kasvatusketjusta.



Kuvio 20. Biomassan kokonaistuotokset istutetulla männiköllä kasvatusketjuittain Kymenlaakson alueen voimajohtoaukeilla.

Kuviosta 20 käy selväksi biomassan kokonaistuotokset Kymenlaakson alueella. Ensimmäistä (1) kasvatusketjua noudattaen voitaisiin Kymenlaakson maakunnan alueelta saada 38 900 m<sup>3</sup> biomassaa, jolloin kiertoaika olisi noin 20 vuotta. Toista (2) kasvatusketjua noudattaen voitaisiin biomassaa saada 39 826 m<sup>3</sup>, jolloin kiertoaika olisi n. 19 vuotta. Kolmannella (3), hyviä metsänhoidon suosituksia noudattavalla kasvatusketjulla saataisiin 35 697 m<sup>3</sup>, jolloin kiertoaika olisi n. 18 vuotta. Parhaimpaan keskimääräiseen tuotokseen yltää toinen (2) kasvatusketju, jossa taimikolle tehdään vain varhaisperkaus, ei taimikonhoitoa. Keskimääräinen biomassan tuotos olisi 2 096 m<sup>3</sup> vuodessa hyödyntäessä kaikki Kymenlaakson maakunnan alueella metsämaalla sijaitsevat voimajohtoaukeat.

## 6.5 Taloudellinen kannattavuus



Kuvio 21. Nettotuottojen nykyarvot energiapajun ja männyn yhtäaikaiselle kasvatukselle, istutetun männikön kasvatukselle sekä luontaisesti uudistetun männikön kasvatukselle.

Kuviosta 21 käy selville nettonykyarvon tila. Luontaisesti uudistettu männikkö sai vähiten negatiivisen arvon, kun energiapajun ja männyn yhteiskasvatus sai kaikista negatiivisimman arvon. Minkäänlaisia viljely- tai korjuutukia toimintoihin ei saatu, mikä osaltaan selittää hyvinkin kuviosta nähtävän tilanteen. Nettonykyarvon laskentaa varten on nähtävillä käytetyt arvot (liite 4). Nettotuottojen nykyarvoissa oli käytetty korkotekijänä kolmea (3) prosenttia.

## 7 Pohdinta

Metsämaat, jotka sijoittuvat voimajohtoaukeille, ovat kartoitettu manuaalisesti Fingrid Oyj:n tarjoamasta karttapalvelusta. Manuaalisesti mittaamalla tapahtuu aina keskivirhettä. Voidaan siis sanoa, että kyseinen 1 077 hehtaarin määrä on jollain tapaa viitteellinen. Myöskin havaintojen määrä, 230 kappaletta, saattaa sisältää keskivirhettä ja todellisuudessa metsämaiden pirstoutuneisuus ei pakosti olekaan yhtä suurta kuin tämä tutkimus antaa olettaa.

On myöskin huomattava, että potentiaaliset viljelyalat esimerkiksi energiapajulle koostuvat keskimäärin pienistä alueista ja energiapajun viljelyksen perustaminen vaatii suuria ja yhtenäisiä aloja. Viljelyalojen kaltevuuttakaan ei tässä opinäytetyössä otettu huomioon. Liian kaltevilla alueilla ei voida energiapajua menestyksekkäästi viljellä. Salpausselät kulkevat Kymenlaakson maakunnan läpi, vaikkakin suurimmilta osin pohjoispuolella, ja on huomioitava, että nämä reu-namuodostelmat aiheuttavat kaltevuutta. Tällöin voidaan ajatella, ettei käytettävää viljelyalaa energiapajulle mahdollisesti olekaan niin paljoa.

Mikäli kasvatettaisiin vain neljän metrin valtapituista metsikköä ja energiapajukkoa, saataisiin 10 vuoden aikana hakattua yhteensä 103 048 m<sup>3</sup>, joka vastaa 94 392 MWh:a ja 0,09 TWh:a. 10 vuoden aikana saatavasta kokonaismäärästä suurin osa, n. 96 % olisi energiapajuhaketta ja vain n. 4 % olisi männyn taimikosta saatavaa haketta. Kyseessä olisi pituudeltaan pieni mutta runkoluvultaan tiheä männyn taimikko ja korjuuvaiheessa voisi ilmetä erilaisia ongelmia, kuten hakettaessa tai viimeistään voimalaitoksella, kun haketta poltetaan. Energiapajun polttokäytössä on haasteensa ja esimerkiksi pelkästään energiapajua polttamalla voimalaitoksen teho on huonompi kuin metsähakkeella. Tällöin voitaisiin miettiä, olisiko energiapajuhaketta mahdollista käyttää seospolttoaineena metsähakkeen seassa. Energiapajulle voisi kuitenkin mahdollisesti löytyä muitakin sovellutuksia kuin hakekäyttö.

Kahdeksan metrin kasvatusohjelman mukaan voimajohtoaukeilta voitaisiin korjata metsähaketta enintään 42 352 m<sup>3</sup>, joka vastaa 84 650 MWh:a ja 0,08

TWh:a, tällöin kasvatettaisiin luontaisesti uudistettua männikköä, hyödyntäen kaikki käytössä olevat 1 077 metsähehtaaria. Tällöin on muistettava, että kiertoaika on n. 20 vuotta. Luontaisesti uudistettavasta männiköstä jalostettavassa hakkeessa on myöskin omat haasteensa laatutekijöiden kautta, kuten istuttaen uudistetussakin. Kokopuuhakkeen käyttäminen esimerkiksi stokeripolttimessa tuottaa haasteita, koska hake todennäköisesti sisältää tikkuja. Suurin ongelma piilee kuitenkin varastosäiliössä, kun hienoainesta sisältä kokopuuhake liimautuu eikä valu alaspäin, jolloin polttoaineen syöttö häiriintyy.

Simulaatiotuloksien tarkastelussa juurikin istutetun männikön osalta nähdään, kuinka männikkö kasvaa eri kasvualustoilla käyttäen toisistaan poikkeavia kasvatusketjuja. Istutetun männikön osalta toinen kasvatusketju, jossa suoritetaan vain varhaisperkaus, tuottaa eniten biomassaa. Tämän tekijän lisäksi metsikkö ei jää paljoakaan pienemmäksi keskiläpimittansa osalta verraten kasvatusketjuun, jossa metsikköä hoidetaan metsänhoidon suositusten mukaisesti. Oli kuitenkin oletettavissa, että metsänhoidon suositusten mukaisesti kasvattaessa metsikkö saa parhaimman keskiläpimitan, koska metsänhoidon suositusten mukaisesti kasvatetaan laadukasta metsikköä. Koin kuitenkin nämä kaksi tekijää, biomassan tuotoksen ja keskiläpimitan, tärkeimmiksi ja laskin kannattavuuslaskelmat toiselle kasvatusketjulle. Oletin myös, että luontaisesti uudistetulla männiköllä ilmenee suurin piirtein samankaltaiset tulokset, ja otin myös luontaisesti uudistetun männikön mukaan kannattavuuslaskelmiin.

Nettotuottojen nykyarvoista nähdään, ettei metsätalouden harjoittaminen edes luontaisesti uudistetuilla voimajohtaukeilla ole kannattavaa. Energiapajun ja männyn yhteiskasvattaminen sai myöskin negatiivisen arvon, koska mäntytaimikon korjuukustannukset olivat liian suuret. Yhtenä kriittisenä toiminnan kannattavuuden tekijänä näkisin sen, ettei toimintaa varten saada minkäänlaisia tuita. Toisena tärkeänä tekijänä näkisin sen, että kahdeksan metrin pituisen puuston läpimitta on liian pieni, kuten myös keskikoko. Laskettaessa kannattavuuksia kuitenkin ilmeni, että energiapajun kasvattaminen yksin olisi ollut taloudellisesti kannattavaa. Ottaessa mukaan samaan kokonaisuuteen pienen männyn taimikon, taloudellinen kannattavuus toiminnalta katosi kokonaan ja painui negatiivisen puolelle. Tässä suhteessa Hakkila (2004, 66) oli oikeassa, että pienikokoisen taimikon korjuun kustannukset nousevat suuriksi. Männyn ja ener-

giapajun yhteiskasvatuksen ja -korjuun nettotuottojen nykyarvoon vaikuttaa suuresti pienen männyntaimikon korjuukustannus, joka on jopa 66,5 €/MWh.

Laskettaessa voimajohtoaukeiden metsämaata varaavaa määrää ilmeni myös voimajohtoaukeiden pirstoutuneisuus, mikäli metsäalueita haluttaisiin hyödyntää jollakin tapaa. Laskettavia otoksia tuli Kymenlaakson maakunnan alueelta mukaan yhteensä 230 kappaletta, joiden summa käytettävissä metsähehtaareissa on 1 077. Kyseisten alueiden aritmeettinen keskiarvo saikin arvokseen vain yhden hehtaarin, vaikka vaihteluväli metsäalueilla oli 0,01–5,99 hehtaaria. Myöskin pienimpään luokitteluväliin, 0,01–0,99, kohdistui eniten otoksia. Metsäalueiden pirstoutuneisuus vaikuttaa kannattavuuteen esimerkiksi työkoneiden siirtojen kautta. Suutarin (2017) mukaan energiapaju vaatii suuria ja yhtenäisiä viljelyalueita, mutta ilman potentiaalikarttaa niitä ei tässä tutkimustyössä voitu kartoittaa, joten energiapajun kannattavuuden tuloksiin kannattaa asennoitua hieman kriittisesti. Määritettäessä metsämaita voimajohtoaukeilla ilmeni myös, että metsämaat ovat ns. ryppäinä ja jokseenkin erillään toisistaan. Tällainen luonne energialeimikoiden sijainneissa varmaankin vaikuttaa koneketjun kustannusrakenteeseen, esimerkiksi koneiden siirtelyiden kautta, kuten Hakkila (2004, 64) teoksessaan mainitsee. Määritettäessä huomioin myös, että voimajohtojen kulkureitit näyttäisivät kulkevan mahdollisimman vähämetsäisillä alueilla.

Toistuvasti tapahtuva energiapuun korjuu ei tiedettävästi vaikuta juurikaan metsämaan ravinnepitoisuuksiin. Voi kuitenkin olla, että vain kokopuuta kerättäessä pitkässä aikavälissä saattaa ilmetä jonkinlaista ravinnekatoa. Kiertoaika on kuitenkin suhteellisen pitkä, n. 15–20 vuotta. Energiapajun osalta ravinnepitoisuus on huomioitu, koska jokaisessa korjuussa viljelyala lannoitetaan uudelleen.

Työturvallisuutta ei voida sivuuttaa käytännön metsätaloudessa. Seurattavien standardien mukaan voimajohtoille on määritelty tarkat etäisyydet maanpinnasta, joita tulee viime kädessä noudattaa. Pienin etäisyys maanpinnasta on 5,9 metriä 100 kV voimajohtolla ja suurin puolestaan 400 kV voimajohtolla 7,9 metriä. Etäisyyksiin tulee vielä ottaa huomioon erikseen annetut varoetäisyydet, ettei sähköstaattista purkautumista tapahdu. Tällöin voidaan miettiä, onko kah-



deksan metrin simulaatiotulokset oikeasti verrattavissa käytettävään metsämaahan, jota on tarjolla voimajohtoaukeilla.

Mikäli kaikki voimajohtoaukeat päätetään metsittää, ei se mahdollisesti palvele yhtä hyvin biodiversiteettiä kuin tänä päivänä. Voimajohtoaukeiden tiheiköt tarjoavat suojaa riistaeläimille. Aukeat ja aurinkoiset alueet tarjoavat myös tärkeän elinympäristön uhanalaisille lajeille.

Jatkotutkimuksia tähän aiheeseen liittyen on mahdollista tehdä. Potentiaalikartta voitaisiin laatia metsäalueille, jotka sijaitsevat voimajohtoaukeilla. Potentiaalikartassa voisi olla myös lämpölaitokset, joissa käytetään haketta. Tällöin voitaisiin tarkastella tosiasiallisesti, paljonko hyödynnettävää metsämaata olisi tarjolla. Myös korkeusjakaumaan perustuva kartta voisi ilmentää, kuinka paljon maanpinnan korkeudet vaihtelevat, koska sillä on merkitys energiapajun kasvattamiseen ja lannoittamiseen ja sitä kautta hulevesiin ja ravinnekuormitukseen. Kannattavuuslaskelmista saataisiin myös tarkempia, mikäli tuotantoketjuun perehdyttäisiin syvällisemmin ja suoritettaisiin konekustannuslaskentaa etsien paras vaihtoehto.

## Lähteet

- Ahvenniemi, P. Pajun viljely. <http://www.energiapaju.fi/paju/viljely.htm>. 4.2.2017.
- Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf>. 4.2.2017. 12, 56.
- Alakangas, E. Hurskainen, M. Laatikainen-Luntama, J. Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2016/T258.pdf>. 1.3.2017. 65, 205.
- Cederberg, J. 2017. Diskonttaus. <https://opetus.tv/mab/mab7/diskonttaus/>. 1.3.2017.
- Etelätalo, E. 2013, Erilaatuisten hakkeiden käyttökohdevaatimuksista ja tuotantokustannuksista. [http://moodle2.karelia.fi/pluginfile.php/383377/mod\\_resource/content/1/Hakeraportti%20Etelatalo.pdf](http://moodle2.karelia.fi/pluginfile.php/383377/mod_resource/content/1/Hakeraportti%20Etelatalo.pdf). 4.2.2017. 14.
- Fingrid Oyj. 2016. Hengen vaara -esite. [http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/Ajankohtaista%20liitteet/Esitteet/Hengenvaara\\_esite.pdf](http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/Ajankohtaista%20liitteet/Esitteet/Hengenvaara_esite.pdf). 4.2.2017. 18.
- Fingrid Oyj. 2016. Voimajohtoauekiden raivaukset. <http://www.fingrid.fi/fi/verkkohankkeet/voimajohtoliitteet/Ymp%C3%A4rist%C3%B6-%20ja%20Turvallisuus-osiot/raivaus%20liite%20suomi.pdf>. 4.2.2017.
- Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999–2003. [https://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/puuenergian\\_teknologiaohjelma.pdf](https://www.tekes.fi/globalassets/julkaisut/puuenergian_teknologiaohjelma.pdf). 4.2.2017. 64–66, 68, 71.
- Hoffrén, S. 2011. Investoinnit ja rahoitus. <http://oili.uef.fi/documents/13140/1389317/UEF+Investoinnit+ja+rahoitus+240211+Compatibility+Mode.pdf/ff0e59fa-c074-43ed-ac40-0a003d780102>. 1.3.2017.
- Hurskainen, L. 2015. Energiapajun viljelypotentiaali Keski-Suomessa ja Pohjois-Karjalassa. Karelia-ammattikorkeakoulu. Metsätalouden koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/94258/Hurskainen\\_Liisa.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/94258/Hurskainen_Liisa.pdf). 4.2.2017. 7. 7.

- Ilvesniemi, H. Hartman, M. Hytönen, J. Lauren, A. Kaila, A. Kantola, M. Kiikkilä, O. Kremsa, J. Kubin, E. Lindgren, M. Lindroos, A-J. Moilanen, M. Murto, T. Nieminen, M. Nieminen, T. Penttilä, T. Piispanen, J. Saarsalmi, A. Smolander, A. Tamminen, P. Ukonmaanaho, L. 2012. Metlan työraportteja 240. Energiapuun korjuun vaikutukset metsiin ja vesistöihin. Metla.  
[http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240\\_2\\_2.2.pdf](http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2012/mwp240_2_2.2.pdf). 4.2.2017. 57–58, 75.
- Jalonen, M. 2017. Voimajohtaukeden käyttö metsätaloudessa. [ta-tu.santamaki@edu.karelia.fi](mailto:ta-tu.santamaki@edu.karelia.fi). 2.2017. 14–27.
- Kuussaari, M. Rytteri, T. Heikkinen, R. Manninen, P. Aitolehti, M. Pöyry, J. Pykälä, J. Ikävalko, J. 2003. Voimajohtaukeden merkitys niittyjen kasveille ja perhosille. Helsinki: Edita.  
[https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40515/SY\\_638.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40515/SY_638.pdf?sequence=1). 3.2.2017. 3.
- Kärki, J. Hurskainen, M. 2015. Pajun käyttö energiantuotannossa – tuloksia polttokokeista.  
[https://peda.net/poke/projektit/luva\\_hankkeet/energiapaju/seminaari/sm/jk:file/download/f80a0b9584c1a2a8e54e0acb1da8f063d1d5bc53/Janne%20K%C3%A4rki\\_Poltto.pdf](https://peda.net/poke/projektit/luva_hankkeet/energiapaju/seminaari/sm/jk:file/download/f80a0b9584c1a2a8e54e0acb1da8f063d1d5bc53/Janne%20K%C3%A4rki_Poltto.pdf). 4.2.2017. 6, 17.
- Laitila, J. Väätäinen, K. Truck transportation and chipping productivity of whole trees and delimbed energy wood in Finland. 2012.  
<http://hrcak.srce.hr/file/172709>. 1.3.2017. 207.
- Luonnonvarakeskus. 2017. Motti-ohjelmisto – työkalu metsänkasvatuksen tueksi. [http://www.metla.fi/metinfo/motti/pdf/Motti-esite\\_15042016.pdf](http://www.metla.fi/metinfo/motti/pdf/Motti-esite_15042016.pdf). 4.2.2017. 1.
- Lötjönen, T. Mäkelä, O. Pietilä, J. 1994. Oksainen hake pienpolttimissa.  
[https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/443083/vtiedote65\\_94.pdf?sequence=1](https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/443083/vtiedote65_94.pdf?sequence=1). 4.2.2017. 3.
- Metsäkeskus. 2017. Metsätiedon keruu.  
<https://www.metsakeskus.fi/metsatiedon-keruu#.VNIC5E1EiAg> 22.2.2017.
- Metsälaki 1093/1996  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961093>. 4.2.2017.
- MHY. 2016. Sähkölinjat ja voimajohdot.  
<http://www.mhy.fi/paijat-hame/edunvalvonta-mhy-paijat-hameessa/sahkolinjat-voimajohdot>. 3.2.2017
- MMM. 2016. Puun Energiakäyttö. <http://mmm.fi/metsat/puun-kaytto/puun-energiakaytto.3.2.2017>

- MTK. 2015. Sähkölinojen lunastustoimitukset ja linjoista maksettavat korvaukset. (MTK, 2015)  
[https://www.mtk.fi/ymparisto/maankaytto/fi\\_FI/sahkolinjat\\_files/93424519978635963/default/MTK-Sahkol-opas-A4\\_2502.pdf](https://www.mtk.fi/ymparisto/maankaytto/fi_FI/sahkolinjat_files/93424519978635963/default/MTK-Sahkol-opas-A4_2502.pdf). 4.2.2017. 18, 22.
- Sihvonen, J. Leinonen, A. Villa, A. Pajun korjuu, varastointi ja toimitus laitokselle – tehtäväraportti. 2013. [www.forestenergy2020.org/openfile/196](http://www.forestenergy2020.org/openfile/196). 1.3.2017. 6, 30, 48.
- Stenkjaer, N. 2009. Energy Willow.  
[http://www.folkecenter.net/gb/rd/biogas/biomass-energy-crops/energy\\_willow/](http://www.folkecenter.net/gb/rd/biogas/biomass-energy-crops/energy_willow/). 1.3.2017.
- Suutari, M. 2017. Energiapajua metsämaassa? [tatu.santamaki@edu.karelia.fi](mailto:tatu.santamaki@edu.karelia.fi)  
22.2.–3.1.2017.
- Suvanto, K. Laajalehto, K. 2005. Tekniikan Fysiikka 2. Helsinki: Edita. 58.
- Tapio. 2008. Kuitupuun mitta -ja laatuvaatimukset.  
<https://tapio.fi/extranet/puukauppa-ja-puunkorjuu/kuitupuun-mitta-ja-laatuvaatimukset/>. 4.2.2017. 1–2.
- Tapio. 2013. Tapio. Metsänhoidon suositukset. Tapio. 26–27, 46, 48–50, 121–122.
- Tuomi, T. Ilmasähkösanasto.  
<http://space.fmi.fi/~makelaa/ilmasahkosanasto.html>. 4.2.2017.
- Verkasalo, E. 2007. Hieskoivu metsänuudistamisessa.  
<http://www.metla.fi/tapahtumat/2007/metsanuudistaminen/hieskoivu-metsanuudistamisessa-verkasalo.pdf>. 4.2.2017. 14–17.
- VTT. 2017. Pajun kilpailukyky energiakäytössä paranee, jos sitä voidaan hyödyntää myös erilaisten vesien puhdistukseen.  
<http://www.forestenergy2020.org/fi/uutiskirjeet/uutiskirje-1-15/paju/:icmsmode/clear>. 4.2.2017.

Liite 1. Laasasenahon tilavuusyhtälöt rinnankorkeusläpimittaan ja pituuteen perustuen

	<b>Rinnankorkeusläpimittaan (d) ja pituuteen (h) perustuvat mallit</b>	<b>keskivirhe, %</b>
<b>Mänty</b>	$v = 0,036089 \times d^{2,01395} \times (0,99676)^d \times h^{2,07025} \times (h - 1,3)^{-1,07209}$	<b>7,2</b>
<b>Kuusi</b>	$v = 0,022927 \times d^{1,91505} \times (0,99146)^d \times h^{2,82541} \times (h - 1,3)^{-1,53547}$	<b>7,6</b>
<b>Koivu</b>	$v = 0,011197 \times d^{2,10253} \times (0,98600)^d \times h^{3,98519} \times (h - 1,3)^{-2,65900}$	<b>8,5</b>

## Liite 2. Kymenlaakson maakunnan kasvupaikkajakauma.

Perustiedot												Kunnan metsätalouden pinta-alalle yleistetyt arvot											
Suodatteut:				7 kpl	298 912	258 451	86,5	1 500	47 876	139 836	88 005	13 541	483	0,5	16,4	48,0	30,2	4,6	0,2				
Palvelu- alue	AMO-alue	Maakunta	Kunta no	Kunta	Metsä- talousma a yhteensä	Metsävara- tietoa yhteensä	Petito %	Kp 1 ha	Kp 2 ha	Kp 3 ha	Kp 4 ha	Kp 5 ha	Kp 6-8 ha	Kp 1 %	Kp 2 %	Kp 3 %	Kp 4 %	Kp 5 %	Kp 6-8 %				
4	KAAKKOIS-SUOMI	KYMENLAAKSO	75	HAMINA	39 877	37 859	94,9	108	5 640	16 790	13 689	2 277	41	0,3	14,6	43,6	35,5	5,9	0,1				
4	KAAKKOIS-SUOMI	KYMENLAAKSO	142	IITTI	35 374	33 579	94,9	235	10 791	15 958	6 642	997	26	0,7	31,1	46,1	19,2	2,9	0,1				
4	KAAKKOIS-SUOMI	KYMENLAAKSO	285	KOTKA	12 652	8 283	65,5	34	1 459	6 124	3 565	733	13	0,3	12,2	51,3	29,9	6,1	0,1				
4	KAAKKOIS-SUOMI	KYMENLAAKSO	286	KOUVOLA	141 073	117 393	83,2	790	20 337	70 293	40 657	6 440	354	0,6	14,6	50,6	29,3	4,6	0,3				
4	KAAKKOIS-SUOMI	KYMENLAAKSO	489	MIEHIKKÄ	27 453	27 063	98,6	203	4 004	11 263	10 387	1 014	13	0,8	14,9	41,9	38,6	3,8	0,0				
4	KAAKKOIS-SUOMI	KYMENLAAKSO	624	PYHTÄÄ	17 719	10 777	60,8	54	2 667	9 551	4 280	527	10	0,3	15,6	55,9	25,0	3,1	0,1				
4	KAAKKOIS-SUOMI	KYMENLAAKSO	935	VIROLAHTI	24 764	23 497	94,9	76	2 978	9 857	8 785	1 554	26	0,3	12,8	42,3	37,7	6,7	0,1				

Liite 3. Taulukko polttoaineiden laatuominaisuuksien vertailuun. (Alakangas, Hurskainen, Laatikainen-Luntama, Korhonen 2016, 205.)

Polttoaine	Kuiva-aineen tehollinen lämpöarvo $q_{p,net,d}$ , MJ/kg	Kosteus $M_{ar}$ , p-%	Tehollinen lämpö- arvo saapumistilassa $q_{p,net,ar}$ , MJ/kg	Irttoiheys BD, kg/irto- $m^3$	Energiatiheys $E_{ar}$ , MWh/irto- $m^3$	Tuhkapitoisuus kuiva-aineessa $A_d$ , p-%
Kivihili	27,0–28,8	8–14	24,3–25,1	-	-	4,4–17,0
Raskas polttoöljy	40,5–41,5	< 0,1	40,5–41,5	985–1 020	-	0,02–0,05
Kevyt polttoöljy	35,2–35,9 MJ/litra	0,01–0,02	35,2–35,9 MJ/litra	820–840	-	< 0,001
Pyrolyysiöljy	18,4–20,1	20–30	13,0–18,0	1100–1300		0,01–0,1
Jyrsinturve (keskiarvo)	20,6	47	9,8	330	0,91	6,3
Palaturve (keskiarvo)	21,3	35	11,9	385	1,30	3,5
Turvepelletti	19,7–21,0	14–18	15,1–18,7	680–750	3,0–3,7	2,0–6,0
Sahanpuru	19,0–19,2	45–60	2,2–10,0	250–350	0,45–0,70	0,4–0,5
Koivunkuori	21,0–23,0	45–55	8,0–11,0	300–400	0,60–0,90	1,0–3,0
Havupuun kuori	18,5–20,0	50–65	5,0–9,0	250–350	0,50–0,70	1,0–3,0
Vanerimurske	19,0–19,2	5–15	16,0–18,0	200–300	0,9–1,1	0,4–0,8
Puupelletit	18,9–19,5	6–9	7,0–18,2	600–650	2,8–3,3	0,1–0,5
Rankahake	18,5–20,0	40–55	7,0–11,0	250–350	0,7–0,9	0,5–2,0
Polttopuu	18,5–19,0	20–25	13,4–14,5	240–320	1,35–1,70 MWh/pino- $m^3$	0,5–1,2
Hakkuutähdehake	18,5–20,0	50–60	6,0–9,0	250–400	0,7–0,9	1,0–3,0
Kokopuuhake	18,5–20,0	45–55	7,0–10,0	250–350	0,7–0,9	1,0–2,0
Kantomurske	17,2–20,9	12–45	6,8–15,5	250–300	0,7–1,2	0,5–20,0 (keskimäärin 4,0)
Pajuhake	18,6	51–53	8,1–8,5	300–440	0,3–0,4	0,4–1,1
Ruokohelpi (kevätkorj.)	17,3–18,7	10–25	12,6–16,6	60–80	0,3	1,0–8,0
Energiajyvä	17,3	11	15,5	600	2,6	2,0
Olki, silputtu	17,4	17–25	12,4–14,0	80	0,3–0,4	5,0
Kierrätyspolttoaine, SRF	17,0–37,0	15–35	13,0–35,0	150–250	0,7–1,0	3,0–7,0
Kotitalouden kuivajäte	18,5–23,4	25–36	11,7–16,9	150–200	0,7–1,0	5,3–16,1

## Liite 4. Kannattavuuslaskennassa käytettyjä arvoja

<b>Paju ja mänty</b>	
Uudistaminen	
Istutus	2200 t/ha
Taimi	0,2 €/t
Laikutus	292 €/ha
Metsänhoitotyöt	
Varhaisperkaus	300 €/ha
Pajun hoito	
Taimet	899 €
Istutusurakointi	258 €
Muut työt	428 €
Ravinteet	280 €
Yhteensä	1 864 €
Muut jatkotyöt	452 €
Korjuun kustannus	
Paju	19,2 €/MWh
Mänty	66,5 €/MWh
Leimikon tiedot	
Työmaan pinta-ala	1 ha
Metsäkuljetusmatka	100 m
Kaukokuljetusmatka	45 km
Energiapuukertymä	10 m <sup>3</sup> /ha
Kokopuun keskikoko	3,53 dm <sup>3</sup>

<b>Mänty, istutus</b>	
Uudistaminen	
Istutus	2400 t/ha
Taimi	0,2 €/t
Laikutus	292 €/ha
Metsänhoitotyöt	
Varhaisperkaus	300 €/ha
Korjuun kustannus	
Mänty	24,38 €/MWh
Leimikon tiedot	
Työmaan pinta-ala	1 ha
Metsäkuljetusmatka	100 m
Kaukokuljetusmatka	45 km
Energiapuukertymä	38,38 m <sup>3</sup> /ha
Kokopuun keskikoko	21,26 dm <sup>3</sup>

<b>Mänty, luontainen</b>	
Uudistaminen	
Luontainen	0 €
Äestys	230 €/ha
Metsänhoitotyöt	
Varhaisperkaus	300 €/ha
Korjuun kustannus	
Mänty	29,1 €/MWh
Leimikon tiedot	
Työmaan pinta-ala	1 ha
Metsäkuljetusmatka	100 m
Kaukokuljetusmatka	45 km
Energiapuukertymä	38,38 m <sup>3</sup> /ha
Kokopuun keskikoko	12,37 dm <sup>3</sup>