,

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Energiatekniikan osasto

Energiantuotannon ympäristötekniikan opintosuunta

ENERGIAPUUN HAKETUKSEN JA MURSKAUKSEN KUSTANNUKSET

Diplomityön aiheen on hyväksynyt koulutusohjelman johtaja 13.4.2010.

Työn 1. tarkastaja	Professori Tapio Ranta
Työn 2. tarkastaja ja ohjaaja	MMM Kalle Karttunen

Jyväskylässä 8.6.2010

Samuli Rinne
Teljintie 4
40530 Jyväskylä
Puh. 0400 - 543 835

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Energiatekniikan koulutusohjelma

Samuli Rinne

Energiapuun haketuksen ja murskauksen kustannukset

Diplomityö

2010

102 sivua, 40 kuvaa ja 13 taulukkoa

Tarkastajat: Professori Tapio Ranta
MMM Kalle Karttunen

Hakusanat: bioenergia, energiapuu, haketus, kannattavuus, kustannuslaskenta, metsäenergia, murskaus, pienpuu, puupolttoaine, työntuottavuus

Energiapuun tuotannossa puu on hienonnettava kuljettimille ja kattilaan sopivaan kokoon. Tämä tehdään Suomessa yleensä joko metsätien varressa välivarastolla, keskitetyssä terminaalissa tai voimalaitoksella. Puu hienonnetaan joko terävillä terillä hakettamalla tai tylpemmillä työkaluilla murskaamalla. Hakkeessa on vähemmän käsittelyä haittaavia pitkiä tikkuja ja sen valmistamiseen tarvittava energia on hiukan pienempi kuin murskaimilla. Viimeksi mainitulla on merkitystä lähinnä karsittua puuta haketettaessa. Murskain puolestaan sallii enemmän epäpuhtauksia raaka-aineessa, joten esimerkiksi kantoja käsitellään vain murskaimilla.

Tässä tarkastellaan erityisesti pienpuun haketuksen ja murskauksen kustannuksia. Pienpuuta saadaan nuoren metsän kunnostuksista ja ensiharvennuksista. Se voi olla joko karsimatonta kokopuuta tai karsittua rankaa.

Kokonaiskustannukset pienpuun haketukselle tai murskaukselle ovat tämän tutkimuksen mukaan välivarastolla noin 3,4 euroa/MWh ja terminaalilla tai voimalaitoksella noin 2 euroa/MWh. Pääomakustannukset ovat pienpuulla tavallisesti 1-1,2 euroa/MWh, keskitetyllä terminaalilla toimittaessa noin kolmanneksen vähemmän, jos pääomalle asetetaan 10% tuottovaatimus. Työvoimakustannukset ovat 30-80 snt/MWh varaston ja laitteen koosta riippuen, käyttöenergia dieselmoottoria käytettäessä noin 50 snt/MWh, sähkömoottorilla noin 30 snt/MWh. Muut kulut, mm. huolto, ovat yhteensä 40-80 snt/MWh. Energiapuun hankinnan kokonaiskustannuksista raaka-aineen hienontamisen osuus on 10-30% puutavaran lajista ja käytetystä työmenetelmästä riippuen.

Terminaaleilla ja voimalaitoksilla toimittaessa on usein kiinnitettävä huomiota melun- ja pölyntorjuntaan. Muun muassa näistä syistä saattaa kiinteä, sähkökäyttöinen murska olla sopiva sellaisiin kohteisiin, joissa käsiteltävät määrät ovat suuria ja toiminta pysyvää. Melun ja pölyn kunnollinen torjunta vaatii suuria rakenteita, joita on vaikea yhdistää liikuteltaviin laitteisiin.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Techical faculty
Department of Energy Technology

Samuli Rinne

The costs of wood fuel chipping and crushing

Master's thesis

2010

102 pages, 40 figures and 13 tables

Examiners: Professor Tapio Ranta
Master of Sciences (Forestry) Kalle Karttunen

Keywords: bioenergy, chipping, cost calculation, crushing, feasibility, forest energy, smallwood, wood fuel, work productivity

Using wood for energy requires comminution of biomass to make it suitable for conveyors and boilers. This is done in Finland mainly either in the forest road side storage, in terminals or at the heat and power plant. Wood fuel is normally comminuted with sharp tools or crushed with more blunt tools. Chipping gives less long wood sticks, which may make it more difficult to handle the material in the receiving and conveying systems. Chipping needs also less comminution energy than crushing. This may be important when chipping delimbed wood. Crusher is, however, more tolerant to impurities in the feed material.

In this thesis the main focus is in the smallwood chipping and crushing. Smallwood is harvested from young stands and first thinnings.

According to this study, the total cost for smallwood comminution is 3,4 Euros/MWh when chipping is done in the roadside storage and about 2 Euros/MWh, if the operation is done in the terminal or at the power plant. Investment and finance costs, when comminuting smallwood, are 1-1,2 Euros/MWh, in terminals one thirds less. This is based on capital cost of 10%. Labour cost is 30-80 c/MWh, depending on the work site and machinery size. Energy required to run the machinery with diesel motor cost about 50 c/wood-MWh and about 30 c/MWh if electric motor is used. Other costs, including maintenance, are 40-80 c/MWh. Of the total costs of wood fuel supply chain, the share of comminution is 10-30%.

When working in the terminals and at the power plants, noise and dust protection must be taken into account. For these and some other reasons, a stationary, electricity-driven crusher may be a good alternative, if the amount of wood to be processed is high enough and operations at the site are permanent. It is needed massive structures and equipment to prevent the noise and dust problems properly and applying these to mobile chippers or crushers is difficult.

ALKUSANAT

Energiapuun haketuksen ja murskauksen kustannusten perusteista on koottua tietoa ollut melko huonosti saatavilla. Tämä työ toivon mukaan paikkaa osaltaan kyseistä puutetta tuomalla samoissa kansissa ainakin keskustelun pohjaksi yleisiä perustietoja ja eräitä ajatusmalleja aiheesta.

Olen aika ajoin työskennellyt aiheen parissa noin vuodesta 1994 lähtien. Tässä diplomityössä onkin taustana käytetty koneyrittäjiltä, laitevalmistajilta ja -myyjiltä sekä voimalaitosten edustajilta tänä aikana saatua erittäin hyvää, mutta usein liian laiskasti muistiin merkitsemääni, kokemusperäistä tietoa.

Hinnoista puhuminen voi toisinaan olla hankala, tasapainoilua ja kompromisseja vaativa laji. Toisaalta toivoisin, että asioita, niin tätä kuin muitakin, käsiteltäisiin mahdollisimman avoimesti, sikäli kun ei ole kyse henkilökohtaisuuksista. Toisaalta jonkinlaisena yrittäjyyden pontimena sallisi pieniä ammattisalaisuuksiakin, varsinkin, kun puuenergia-ala ei toistaiseksi ole ollut mikään kultakaivos toimijoilleen, vaikka leivässä onkin saattanut pitää.

Tämä työ on osa ”Energiapuuta Etelä-Savosta”-hanketta. Työ kuuluu Aalto-yliopiston kauppakorkeakoulun pienyrityskeskuksen alihankintaan. Tarkastajien lisäksi kiitokset Jari Handelbergille Aalto-yliopistosta. Lukijoille pahoittelut tiukasta aikataulusta ja hyvin sisäistämästäni vetelehtimisen mukavuudesta,joiden vaikutus saattaa näkyä paikka paikoin.

Kuten mainitusta vuosiluvusta 1994 oletettavasti jo arvasittekin, opintoni olivat jääneet retuperälle pitkäksi aikaa. Yritin kuitenkin vielä. Lukuvuosi Lappeenrannassa 15 vuoden tauon jälkeen oli useinakin hetkinä varsin hauska ja viihteellinen kuten vanhaan hyvään aikaan. Tästä kiitoksia erityisesti joviaaleille kanssaopiskelijoille!

Jyväskylässä 8.6.2010

Samuli Rinne

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 4

1.1 Tavoite 5

1.2 Aineisto ja menetelmät 6

2 VOIMALAITOSTEN POLTTOAINEKÄYTÖN MÄÄRÄYTYMINEN 6

3 VOIMALAITOSTEN VAATIMUKSET PUUPOLTTOAINEELLE 11

4 RAAKA-AINEEN SAATAVUUS 15

5 METSÄENERGIAN TUOTANTOKETJUT 22

6 HAKETUS- JA MURSKAUSTEKNIIKKA 25

6.1 Laikkahakkuri 28

6.2 Rumpuhakkuri 29

6.3 Vasaramurskain 30

6.4 Hidaskäyntinen murskain 32

7 KUSTANNUKSET LAJEITTAIN 34

7.1. Haketuksen tai murskauksen tuottavuus 34

7.1.1 Tuottavuuteen vaikuttavat asiat 34

7.1.2 Tuottavuuksia käytännössä 37

7.1.3 Laskentaperusteina käytetyt tuottavuudet 41

7.2 Laitteiden käyttöikä ja kuluminen 44

7.3 Rahoitus 47

7.4 Työvoima 49

7.5 Terä- ja muu huolto 50

7.6 Käyttämiseen tarvittava energia 54

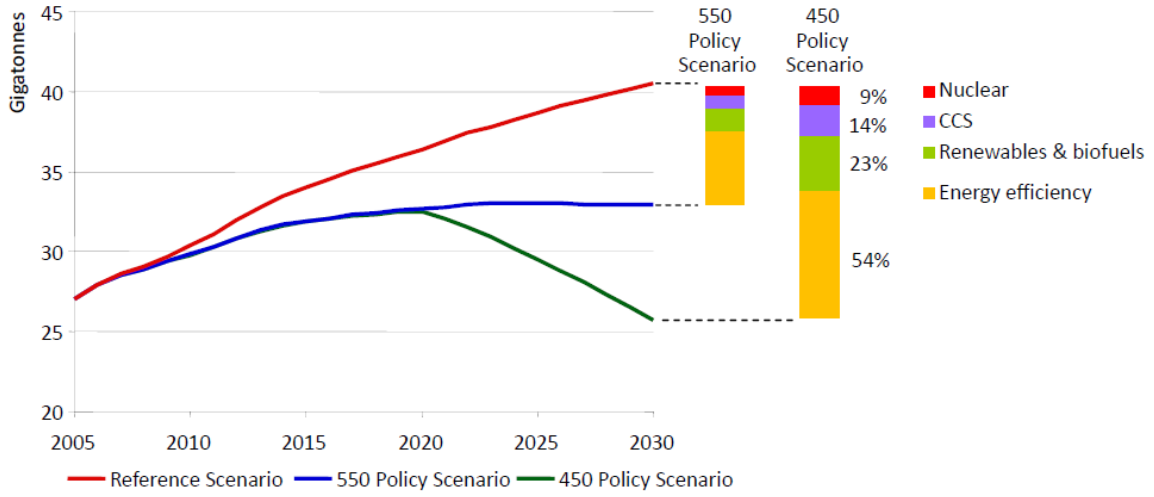
7.7 Pölyntorjunta 62

7.8 Meluntorjunta 65

8 TULOKSET 67
8.1 Haketuksen kokonaiskustannukset 68
8.1.1 Keskikokoinen hakkuri välivarastolla 68
8.1.2 Suuri hakkuri välivarastolla 70
8.2 Murskauksen kokonaiskustannukset 72
8.2.1 Keskikokoinen murskain terminaalissa 72
8.2.2 Suuri murskain terminaalissa 74
8.2.3 Keskikokoinen murskain voimalaitoksella 76
8.2.4 Suuri murskain voimalaitoksella 78
8.3 Eri vaihtoehtojen kustannusvertailu 80
9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 84
LÄHTEET 87
SANASTO 97

1 JOHDANTO

Ilmaston lämpenemisen rajoittamiseksi kohtuulliseksi katsotulle kahden asteen tasolle kasvihuonekaasupäästöjä pitäisi leikata maailmanlaajuisesti puoleen nykyisestä vuoteen 2050 mennessä. Päästöt kasvavat ennustetun perusuran mukaisesti kuitenkin yli kaksinkertaisiksi kyseisellä aikavälillä, ellei tarvittaviin toimenpiteisiin ryhdytä. Kuvassa 1 on International Energy Agencyn, IEA:n näkemys maailmanlaajuisesti tarvittavien toimien suhteellisesta osuudesta, kun päästöjä pyritään laskemaan perusuralta kestävälle tasolle.



Kuva 1. *IEA:n esittämiä keinoja päästötavoitteen saavuttamiseksi (Tanaka 2009, 4). Luvut 550 ja 450 ovat hiilidioksidipitoisuuksia ilmakehässä, yksikkönä ppm. 450 ppm:n taso vastaa mainittua, tavoitteeksi asetettua, korkeintaan kahden asteen keskilämpötilan nousua. Pystyakselilla on nettohiilipäästöjen vuosimäärä.*

Tavoitteeseen voidaan päästä energiaa kuluttavia toimintoja vähentämällä, energiatehokkuutta parantamalla, hiilidioksidin talteenotolla ja varastoinnilla sekä uusiutuvien ja ydinvoiman käyttöä lisäämällä. Yksikään keino ei sellaisenaan riitä, ainakaan globaali näkökulma huomioiden, vaan mainituista keinoista tarvitaan yhdistelmä, jonka tarkka kokoonpano riippuu halutuista päämääristä. Puupolttoaineiden tai minkä tahansa muun energiamuodon roolia voidaan arvioida esimerkiksi tarkastelemalla välittömiä ja välillisiä kustannuksia, yhteiskunnallisia ja ympäristövaikutuksia sekä toteutettavuutta.

Bioenergia pelkästä puusta puhumattakaan ei yksinään riitä päästöjen rajoittamiseksi tavoitellulle tasolle, mutta tiettyjen bioenergialajien kustannuskilpailukyky ja muut vaikutukset erityisesti suoraan poltettuna ovat sen verran hyviä moniin muihin vaihtoehtoihin verrattuna, että esimerkiksi EU:ssa on asetettu maakohtaisia tavoitteita uusiutuvien energioiden osuudelle koko energiankäytöstä.

Uusiutuvien energianlähteiden käytöllä on muitakin perusteita kuin kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, mm. työllisyys, huoltovarmuus ja omavaraisuus sekä mahdolliset muutkin ympäristöhyödyt. Varsinkin metsäteollisuuden sivutuotteiden käyttö on sellaisenaankin myös taloudellisesti kannattavaa ilman ulkoisvaikutusten huomiointiakin. Yksi merkittävä bioenergian etu verrattuna muuten hyviin ja tulevaisuudessa todennäköisesti myös kustannustehokkaisiin energiamuotoihin, kuten tuuleen ja aurinkoon, on sen melko hyvä kausivarastointimahdollisuus erityisesti Suomen kaltaisessa maassa.

Bioenergian tuotantoketjuissa yksi keskeinen työvaihe on puubiomassan hienontaminen sopivaan palakokoon, jotta sitä voidaan riittävän helposti käsitellä ja jotta palaminen on hallittua. Energiapuun hankinnan kokonaiskustannuksista raaka-aineen hienontamisen osuus on 10-30% puutavaran lajista ja käytetystä työmenetelmästä riippuen (Kärhä 2009). Lisäksi koko logistiikka riippuu haketus- tai murskauspaikasta. Aihetta käsitellään tässä työssä Suomen olosuhteet huomioiden.

1.1 TAVOITE

Työssä tarkastellaan haketuksen tai murskauksen kustannusrakennetta erityisesti pienpuuhakkeen eri toimitusketjuissa. Lisäksi selvitetään vuotuisen työmäärän vaikutusta yksikkökustannuksiin. Tarkasteltavina toimitusketjuina ovat tienvarsivarastolla, terminaalilla ja voimalaitoksella perustuvaan hienontamiseen perustuvat menetelmät. Myös ketjujen kokonaiskustannuksia tarkastellaan lyhyesti. Hakkeen ja murskeen ajateltuina käyttäjinä ovat ensisijaisesti suuret voimalaitokset.

1.2 MENETELMÄT

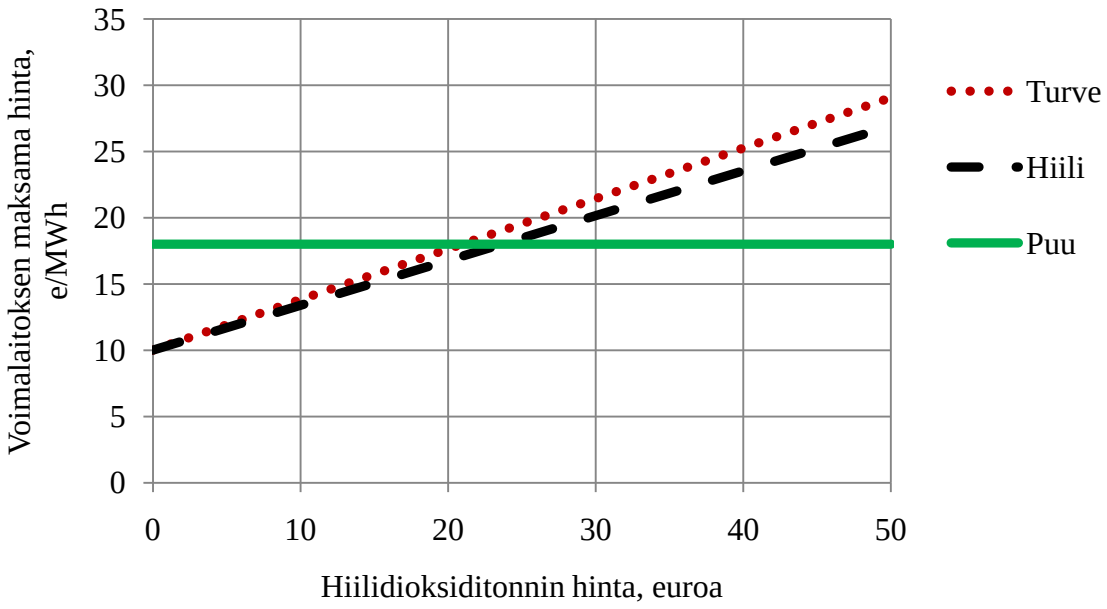
Lähtötietoina arviointeihin on käytetty pääosin muita tutkimuksia. Tässä työssä muodostetaan yhteenveto ja kokonaisarviointi aiempien tutkimusten ja kokemusperäisen tiedon perusteella. Kokemusperäistä tietoa käytetään muiden tutkimusten tukena ja silloin, jos tietoa muualta ei ole julkisesti saatavana. Laitevaihtoehtoina ajatellaan käytettävän pääosin olemassa olevaa tekniikkaa, mutta myös joitakin uusia mahdollisuuksia on käsitelty.

2 VOIMALAITOSTEN POLTTOAINEKÄYTÖN MÄÄRÄYTYMINEN

Teknisesti helpoin lisäkäyttöpotentiaali puupolttoaineelle Suomessa on sähköä ja lämpöä tuottavien laitosten leijukerroskattiloissa. Näissä se korvaisi enimmäkseen turvetta ja kivihiiltä, jatkossa muissa kattiloissa hiiltä mahdollisesti enemmänkin, esimerkiksi Helsingin ja Turun energiaratkaisuista riippuen. Myös öljyn korvaaminen pienemmissä, vain lämpöä tuottavissa laitoksissa tarjoaa mahdollisuuksia, joskin vähemmän (Elo 2009).

Kaikki eurooppalaiset polttoaineteholtaan yli 20 MW:n laitokset kuuluvat päästökaupan piiriin. Siinä kullekin laitokselle on määrätty kiintiö, jonka ylittävistä hiilidioksidipäästöistä laitos maksaa markkinoilla määräytyvää hintaa ja vastaavasti jos päästöt alittavat kiintiön, laitos voi myydä oikeutensa muille. Polttoaineen hiilidioksidipäästö energiayksikköä kohden vaikuttaa siis suoraan sen hintaan näillä laitoksilla. (Energiateollisuus 2010).

Laitoksen puustamaksukyky ja metsähakkeen käyttömäärät riippuvatkin olennaisesti päästöoikeuden hinnasta. Turpeen ja kivihiilen hinta verottomana ja ilman päästöoikeuden hintaa on huhtikuussa 2010 noin 10 euroa/MWh (Pöyry 2010). Toisin kuin turpeen, hiilen hinta vaihtelee melko paljon maailmanmarkkinatilanteen mukaan. Päästöoikeuden hinnan vaikutusta polttoaineiden keskinäisiin hintasuhteisiin esittää kuva 2. Puun hinta on otettu metsähakkeen nykyhintatason mukaan.



Kuva 2. *Puun, kivihiilen ja turpeen hinnat päästöoikeuden hinnan mukaan, jos käyttäjä kuuluu päästökauppaan. Kuva pätee, jos polttoaineiden käyttöominaisuudet ovat samanlaisia. Turpeen ja kivihiilen hinta ilman päästömaksua on 10 euroa/MWh.*

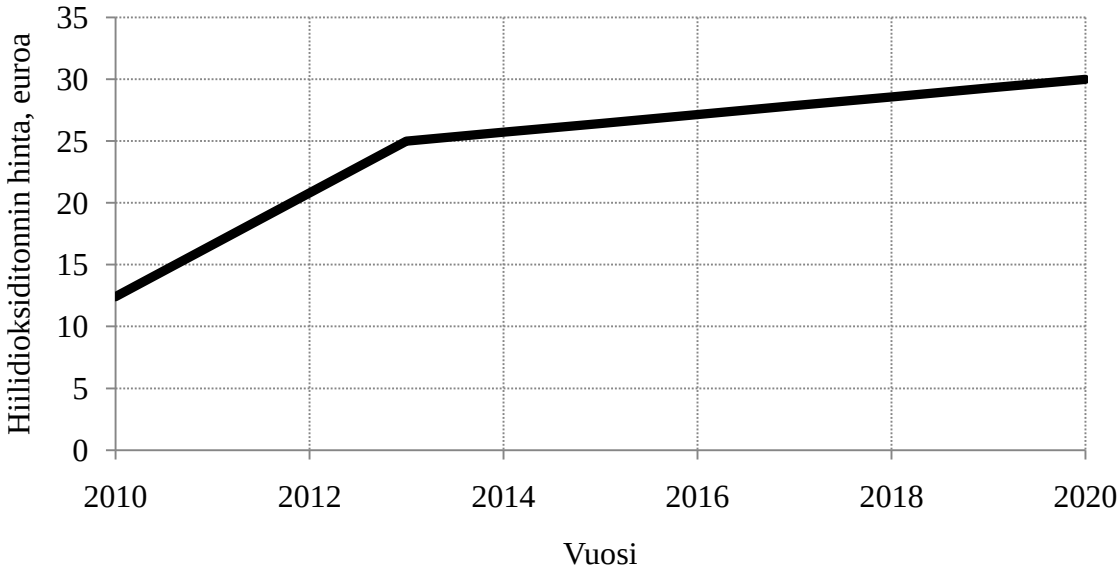
Päästöoikeuden tulevaa hintaa on vaikea arvioida ja myös julkisuudessa arvioita on niukasti, vaikka esimerkiksi polttoaineentuotantoketjujen ja laitosratkaisujen valmistelun ja ennakoinnin kannalta tieto olisi hyvin tärkeä.

IEA on arvioinut päästövähennysten kustannuksia vuoteen 2050 mennessä. Noin 30% vaadittavista vähennyksistä on toteutettavissa negatiivisin kustannuksin, toisin sanoen taloudellisesti kannattavasti ilman päästökauppaakin. Nämä keinot ovat lähinnä energian loppukäytön tehostamista, esimerkiksi paremmin eristetyin rakennuksin. Seuraavaksi edullisin potentiaali on sähköntuotannossa. Kaikkiaan noin 60% vaadittavista vähennyksistä on toteutettavissa alle 30 euron hiilidioksidipäästön tonnihinnalla. (IEA 2008).

Kalleimmat päästöjen vähennykset saavutetaan IEA:n mukaan liikenteen vaihtoehtoisilla polttoaineilla. Jos vähennystavoitteeseen aiotaan päästä teknisin keinoin, kulutustottumuksia muuttamatta, kalleimmat vältetyt hiilidioksiditonnit maksavat noin 130-330 euroa riippuen siitä, kuinka nopeasti teknologia kehittyy (IEA 2008).

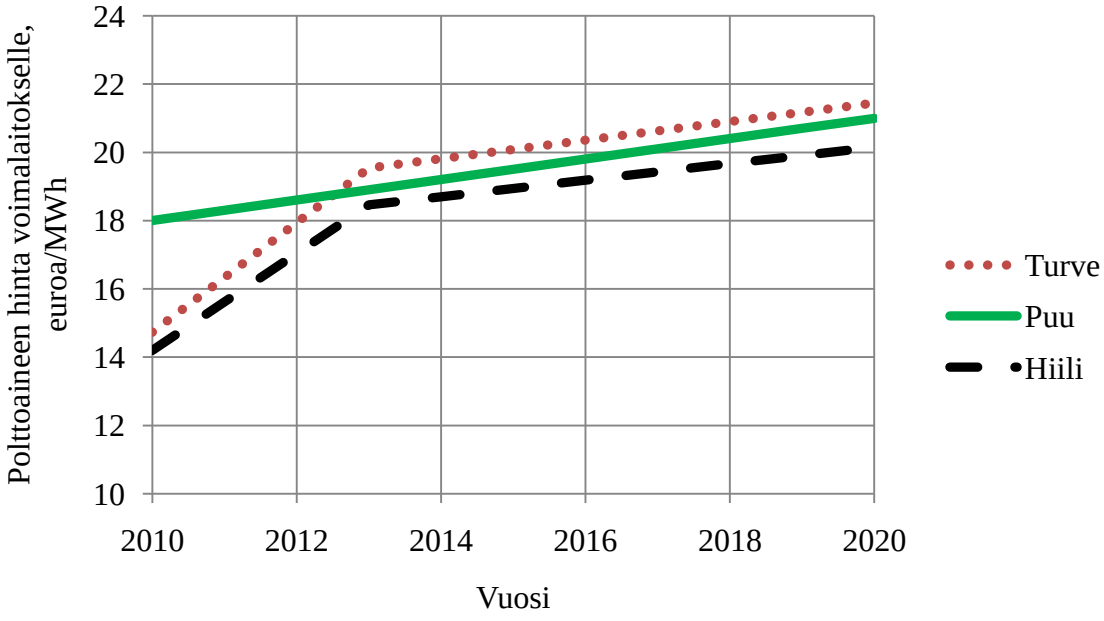
Lähitulevaisuudessa päästöoikeuksien hinnat lienevät kuitenkin huomattavasti edullisempia. Kuvassa 3 on yksi esimerkki päästöoikeuden hinta-arviosta. Samansuuntaisia ennustei-

ta on esitetty myös muilta tahoilta, joten taso 25-30 euroa/tonni lähivuosien aikana lienee melko todennäköinen.



Kuva 3. *Päästöoikeuden hintaennuste Citigroup-pankin mukaan (Brown 2009).*

Kun kuvien 2 ja 3 tiedot ja arviot yhdistetään, saadaan kuvan 4 mukainen arvio polttoaineiden käyttäjähinnoista lähivuosina. Puunkin hinnan on oletettu lievästi nousevan, koska kuljetusmatkat ovat entistä pidempiä ja leimikot huonompia käyttömäärien lisääntyessä. Tämän ohella myös kantohintapaineet saattavat lisääntyä.



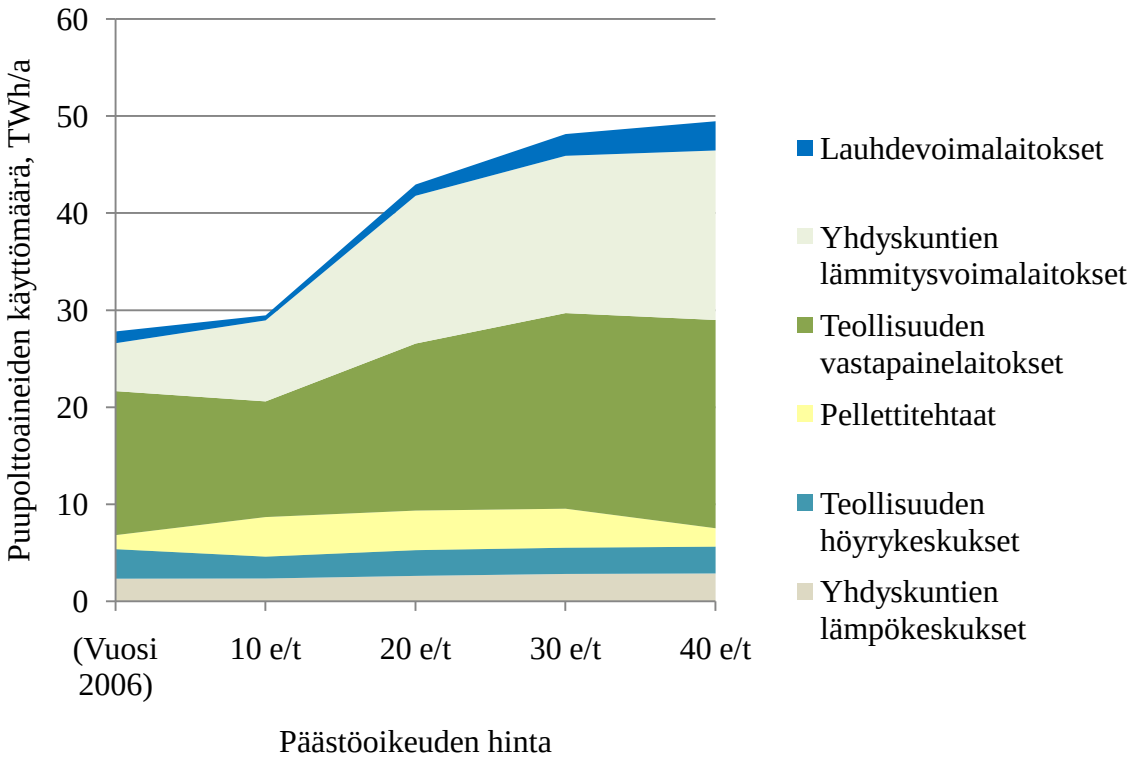
Kuva 4. *Arvio polttoaineiden käyttäjähinnoista päästökaupan alaisille laitoksille vuoteen 2020. Puusähkön tuotantotukea, noin 2,5 euroa polttoaineen MWh:lle, ei ole huomioitu.*

Työ- ja elinkeinoministeriö kuitenkin lienee vuoden-parin kuluessa maksamassa puupolttoaineille eräänlaisen päästöoikeuden takuuhinnan, jos markkinahinta on alle 23 euroa/tonni. Näin ollen ainakin toistaiseksi voidaan käyttää päästöoikeuden hintana vähintään kyseistä 23 euroa/tonni, kun tarkastellaan polttoaineiden käytön suhteellista kannattavuutta voimalaitoksen näkökulmasta. Tukea maksetaan vain sähköä tuottaville laitoksille ja se korvaa nykyisen puusähkötuen, joka on 6,9 euroa sähkömegawattittuntia kohden eli noin 2,5 euroa polttoaineen MWh:a kohden. Lisäksi pienpuulle maksetaan nykyään kestävän metsätalouden rahoitustukea, ”Kemera”, metsänhoidollisin perustein. Tuki on noin 5 euroa/MWh. Kemera-tuki on kuitenkin korvautumassa uudella järjestelmällä, jonka tukitasosta ei vielä ole tarkkaa tietoa. Otaksuttu on, että tuki olisi noin 4 euroa/MWh. (Fredriksson 2010).

Mainitulla päästöoikeuden hinnalla (23 e/t) puu, turve ja hiili ovat kutakuinkin samanhintaisia, ellei muita tukia tai veroja ole.

Päästöoikeuden hinnan ohella on otettava huomioon se, että puupolttoaineen käyttö lisää laitoksen käyttökustannuksia turpeeseen tai hiileen verrattuna. Tämän vaikutus on kuitenkin pieni hiilidioksidipäästöjen vaikutukseen verrattuna, vain noin 30 snt/MWh, jos laitos käyttää puuta 70% koko polttoaine-energiasta (Suomalainen 2001, 2).

Jos päästöoikeuden hinta, muut tuet ja verot, puupolttoaineiden tuotantokustannukset kullekin käyttöpaikalle tuotuna ja kilpailevien polttoaineiden sekä käyttötekniikoiden kustannukset tiedetään, voidaan tehdä arvio polttoaineiden tulevasta käytöstä. Oletuksena tällöin on, että käyttäjät toimivat taloudellisesti rationaalisesti, toisin sanoen valitsevat sen polttoaineen, joka on niille kulloinkin edullisinta. Tällaisen tarkastelun ovat tehneet Metsäteho ja Pöyry. Kuvassa 5 on esitetty puupolttoaineiden käytön jakauma tällä oletuksella eri päästöoikeuden hinnoilla. Kasvu tulee metsähakkeesta, sillä metsäteollisuuden sivutuotteiden määrän oletetaan tässä vähenevän nykyisestä 22 TWh:sta 18 TWh:iin. (Elo 2009).



Kuva 5. *Kiinteiden, kaupallisten puupolttoaineiden taloudellisia käyttömääriä Suomessa eri kohteissa erisuuruisilla päästöoikeuden hinnoilla vuonna 2020 (Elo 2009).*

Asian voi ajatella myös metsänomistajan ja koneyrittäjien kannalta siten, että mitä suurempi päästöoikeuden hinta, sitä enemmän laitoksilla on puustamaksukykyä, ks. myös kuva 2. Suurempi maksuvalmius voi todentua suurempina puunkäyttömäärinä ja pidempinä mahdollistuvina kuljetusmatkoina, mutta myös suurempina tuloina tuotantoketjussa toimijoille.

Suurin taloudellinen käyttöpotentiaali on kuvan 5 mukaan siis vähintään keskisuurissa kattiloissa. Nämä ovat Suomessa lähes poikkeuksetta leijukerroskattiloita, joten tässä esityksessä jatkossa polttoaine ajatellaan tuotettavan ensisijaisesti niihin. Kaikkiaan puupolttoaineiden teknisen käyttöpotentiaalin on laskettu olevan vuonna 2020 53 TWh/a (Elo 2009), joten esimerkiksi päästöoikeuden hinnalla 30 euroa/tonni päästään kaupallisinkin perustein jo lähelle teknistä maksimia.

Toisaalta teknistä kapasiteettia on saatavissa lisää tekemällä vanhoihin laitoksia laajoja modernisointeja polttoaineenvaihdoksiin tähdäten. Teknisen käyttöpotentiaalin raja on häilyvä ja riippuu siitä, kuinka paljon muutostöiden sallitaan maksaa. Riittävän suurella päästöoikeuden hinnallahan kannattaa rakentaa ääritapauksessa täysin uudet biomassaa käyttä-

vät laitokset vanhojen fossiilisia polttoaineita käyttävien laitosten tilalle ja siten lopettaa fossiilisten käyttö kokonaan. Käytännössä tässä tulee taloudellisten tekijöiden lisäksi biomassan riittävyys vastaan tai biomassankin hinta nousee liian suureksi.

Ajan myötä myös muut uusiutuvat energianlähteet tullevat sen verran edullisiksi, että biomassan käyttö ei enää kasva tiettyä määrää suuremmaksi. Tuulivoima on todennäköisesti nopeimmin merkittäväksi muodostuva suuren lisäyspotentiaalin energiantuotantomuoto biomassan ohella. Merituulivoiman tuotantokustannuksen Suomen olosuhteissa on oletettu olevan vuonna 2030 noin 7 snt/kWh, saman verran kuin hiililauhdevoiman silloisella oletetulla päästöoikeuden hinnalla 45 euroa/tonni. (VTT 2008). Tälläkin perusteella voidaan olettaa, että kiinteiden puupolttoaineiden maksimikäyttö voimalaitoksissa Suomessa on mainittu 50 TWh/a, ellei esimerkiksi merkittävä vihreän sähkön vienti muuta tilannetta.

3 VOIMALAITOSTEN VAATIMUKSET PUUPOLTTOAINEELLE

Laitoskohtainen puupolttoaineen maksimiosuus riippuu vastaanotto- ja kuljetinjärjestelmistä, kattilan materiaaleista ja tuorehöyryn arvoista sekä muista polttoaineista eli kemialliselta kannalta kattilan kestävyydestä erityisesti vihreän metsähakkeen aiheuttamaa syöpymistä vastaan. Syöpymisongelmia ei käsitellä tässä työssä, koska niihin ei mekaanisella polttoaineen käsittelytekniikalla voida vaikuttaa.

Polttoaineenkäsittelylaitteiden kannalta hankalia ovat pitkät tikut. Ne saattavat haitata suurissakin laitoksissa, joskaan ongelma ei ole niissä kovin yleinen. Erityisesti pienet ruuvikuljettimet ovat herkkiä tikuille. Tikkuja ei saada kovin hyvin pois kiekkoseulallakaan, jollainen on lähes kaikilla lämpöä ja sähköä tekevillä laitoksilla. Tikut pääsevät putoamaan pystyasennossa kiekkojen väleistä. Toisaalta seulan ylitemurskaimet voivat nekin läpäistä tikut, koska kyseiset murskaimet ovat usein hidaskäyntisiä, sellaisia, joissa teräkiekot pyörivät toistensa lomassa. Tikut pääsevät kiekkojen väleistä aina kun terä ei ole kohdalla. Pienillä lämpölaitoksilla, joilla seulaa ja ylitemurskainta ei ole, ongelma on yleisempi ja haitallisempi. (Energia-Ekono 1998).

Laitoksissa saattaa esiintyä myös puupolttoaineen, erityisesti pitkiä paloja sisältävän kuoriym. murskeen, huonosta juoksevuudesta ja holvautuvuudesta johtuvia ongelmia siiloissa,

pudotussuppiloissa ym. Näin on erityisesti alun perin jyrsinturpeelle suunnitelluissa laitoksissa. Metsäteollisuuden laitokset on jo lähtökohtaisesti suunniteltu puupolttoaineille, esimerkiksi metsähaketta hankalammalle pitkälle kuorellekin, joten niissä ongelmia ei yleensä liiemmälti ole. Turvelaitoksissa ongelmana voi olla puupolttoaineen holvautuvuuden lisäksi se, että kuljettimien tilavuusvirtakapasiteetti ei riitä energiatiheydeltään heikomman puun käsittelyyn. Jyrsinturpeen energiatiheys on tyypillisesti 0,9 MWh/irto-m^3, kun se metsähakkeella on tyypillisesti 0,7 - 0,8 MWh/irto-m^3. (Impola 2002).

Murskaimilla tuotetun puupolttoaineen laatu ei tavallisesti ole sopivaa pienkohteisiin. Sekä hienoainesta että ylisuuria paloja on liikaa. Joissakin arinakattiloissa hienoaines päätyy helposti palamattomana tuhkan sekaan ja toisaalta liian suuret kappaleet eivät ehdi palaa loppuun. Myös käsittelylaitteissa on ongelmia jo suurissakin laitoksissa, mainittujen tikkujen vuoksi. Pienissä laitoksissa ongelma korostuu kuljettimien pienuuden johdosta.

Leijukerroskattilat sallivat periaatteessa melko laajan palakokojakauman. Joitakin rajoituksia kuitenkin on, ennen kaikkea kuivalla ja toisaalta hyvin kostealla polttoaineella.

Liian suuret kuivan polttoaineen palat saattavat nostaa liikaa petilämpötiloja, liian pienet ja taas palaa liian ylhäällä ja nostaa liikaa tulistinlämpötiloja. Esimerkiksi kuivan, suuripalaisen kantomurskeen on havaittu palavan pedissä liian alhaalla. Tällöin joudutaan käyttämään savukaasun kierrätystä, mikä lisää laitoksen sähkönkulutusta tai jopa kastelemaan polttoainetta. Toisaalta liian märkä polttoaine voi aiheuttaa sen, ettei kattilasta saada täyttä tehoa. Kovin hienojakoinen polttoaine, esim. puru, voi puolestaan lisätä hiukkaspäästöjä. (Orjala ym. 2002, Partanen 2010, Kaipainen ym. 1994).

Myös epäpuhtaudet saattavat haitata laitosten toimintaa. Joissakin leijukattiloissa, varsinkin vanhemmissa, pohjan rakenne on sen verran umpinainen, että polttoaineen mukana tulleet kivet eivät pääse pois tuhkanpoiston mukana, vaan ne pitää poistaa käsin vuosihuollon yhteydessä. Lisäksi kivet saattavat aiheuttaa leijutusilman virtaukseen häiriöitä, jotka johtavat pedin ylikuumenemiseen ja tuhkan sulamiseen, jolloin huonoimmassa tapauksessa koko kattila joudutaan ajamaan kylmäksi ja piikkaamaan syntynyt ”kakku” pois.

Tällöin on käytettävä yleensä öljyä varapolttoaineena pelkkää lämpöä tuottavissa vara- ja huippukattiloissa, jolloin kalliimman polttoaineen ja sähköntuotannon menetyksen vuoksi

syntyvä taloudellinen tappio on suuri. Sama tilanne syntyy, jos kostean ja mahdollisesti samanaikaisesti liian suuripalaisen polttoaineen vuoksi kattilasta ei saada täyttä tehoa täyden tehontarpeen tilanteessa. Tällainen on tavanomaisilla suomalaisilla lämmitysvoimalaitoksilla noin 5 asteen pakkasta kylmemmällä kelillä.

Epäpuhtausongelma on merkittävin kannoilla, sahojen pöydänaluskuorella ja jossakin määrin päätehakkuiden oksa- ja latvusmassalla. Pienpuu on yleensä varsin puhdasta eikä aiheuta ongelmia tässä mielessä.

Teräväteräisillä hakkureilla on se etu murskaimiin verrattuna, että ne ohjaavat ajattelemaan epäpuhtauksia jo metsäpäässä. Hakkurin kuljettajan suora, henkilökohtainen palaute raaka-aineen kivisyydestä metsäkoneenkuljettajalle on tehokkaampi viesti kuin voimalaitokselta koko yrittäjäjoukolle tuleva vastaa, yleisluontoinen viesti. Hakkurilla tehty hake onkin laitoksilla tehtyjen havaintojen mukaan puhtaampaa kuin esimerkiksi voimalaitoksella olevan murskaimen kautta tullut tavara (Rinne 2006a).

Edellä mainitun perusteella palakoon optimi riippuu kosteudesta ja kattilan mitoituksesta. Karkeasti arvioiden voidaan esittää yhteenvetona seuraavaa:

- Kuiva puu on suotavaa toimittaa sellaisena, että siinä ei ole suuria kappaleita eikä toisaalta kovin paljon hienoainesta. Hyvälaatuinen hake täyttää tämän ehdon paremmin kuin esimerkiksi murske. Hyvin kuivalla (kosteus alle 35%) puulla suuri hienoaineksen määrä voi aiheuttaa pölyräjähdysriskin.
- Keskikostealla, kattilan polttoainekosteuden mitoitusarvoa (yleensä 40-50%) kosteudeltaan lähellä olevalla puulla palakoolla ei ole suurta merkitystä, varsinkaan, ellei ajeta täydellä teholla. Lähinnä käsittelylaitteiden toiminta määrää suurimman sallitun palakoon. Tikkujen osuuden pitäminen kohtuullisena määrää käytännössä myös muun palakoon.
- Märällä puulla (kosteus yli 50%) palakoon on hyvä olla jälleen mahdollisimman tasalaatuista, ainakin jos kattila toimii täydellä tehollaan. Liian suuret palat eivät anna täyttä tehoa hitaan palamisen vuoksi, liian pienet saattavat kulkeutua palamattomina savukaasuvirran mukana (Kaipainen ym. 1994, liite 1).

- Kovin märän (yli 55%) puun toimittaminen laitokselle tarkoittaa sitä, että toimitusketjussa on tapahtunut virhe raaka-aineen varastoinnissa, eikä tällaista tule ottaa lähtökohdaksi.
- Käsittelylaitteiden kannalta laveasta palakokojakaumasta ei ole haittaa, päinvastoin, sillä kuljettimien voimantarve lisääntyy palakoon tasalaatuistuessa (Seppänen 1988, 12). Pitkien tikkujen haitallisuus on kuitenkin muistettava.
- Kaikissa tapauksissa on etua polttoaineen laadun tasaisuudesta. Tällöin polttoaineen syöttö on helpompi säätää sopivaksi eikä kattilan teho huoju ylimääräisiä päästöjä aiheuttaen ja hyötysuhdetta heikentäen.

Kuivan puun keskikosteaa kapeampi optimialue ei kuitenkaan tarkoita sitä, että sen tuottamista tulisi välttää. Kuivuudesta on hyötyä sekä kuljetustalouden kannalta energiasisällöltään suurempien kuormien muodossa että polton kannalta puusta saatavan hyötyenergiamäärän kannalta. Vesihöyry pääsee tavallisimmin sellaisenaan piipusta ulos, joten sen haihduttamiseen kuluva energia menee hukkaan.

Vaatimukset ovat luonnollisesti sitä tiukempia, mitä suurempi osuus kyseisellä puupolttoaineella on koko senhetkisestä polttoainekäytöstä kokonaisuutena. Myös muut samanaikaisesti käytetyt polttoaineet, erityisesti niiden kosteus, vaikuttavat optimiin. Mainituista asioista ei kuitenkaan ole ainakaan tämän tekijällä tiedossa tarkkoja, kattavia mittaustuloksia, joten esimerkiksi vaatimuksista poikkeamisen rahallinen arvottaminen on vaikeata.

Varastoinnin kannalta suuri palako olisi suositeltava. Seppänen (1988, 13-14) on esittänyt taulukon 1 mukaisia eroja suuren ja tavanomaisen palakoon hakkeille.

Taulukko 1. Palakooltaan 100 mm ja 15-20 mm hakkeiden varastointikelpoisuuden vertailua (Seppänen 1988, 13-14).

	100 mm:n palat	15-20 mm:n palat
Lämpeneminen, 60 m^3 :n kasa	ei lämpene	60-65 ^oC:een 2-3 viikossa
Kuivuminen 6 kk:ssa	kuivuu 35-40 %:iin	kuivuu hiukan 45-50%:iin
Kuiva-ainetappiot 6 kk:ssa	5-10%	15-20%
Pieneliöstön määrä 6 kk:n varastoinnin jälkeen	10^3-kertainen	10^6-kertainen

Vertailussa on otettava huomioon, että 100 mm:n palat olivat karsittua rankaa ja 15-20 mm:n palat oksa- ja latvusmassaa. Tämä selittää osan eroista, mutta siitä huolimatta on myös muiden kokemusten perusteella ilmeistä, että suurempi palakoko vähentää varastoinnissa tulevaa hitaan palamisen aiheuttamaa kuiva-ainetappiota, siis energiasisällön häviköä. Tavallisimmin asia otetaan huomioon siten, että vain hakettamatonta materiaalia varastoidaan.

Varastointitilan säästämiseksi ennen kaikkea terminaaleissa olisi kuitenkin mahdollista varastoida myös karkeasti murskattua tavaraa. Ei-liian-suurella palakoolla kuormakoot kaukokuljetuksessa saataisiin lähes tai aivan yhtä suuriksi kuin lopulliseen palakokoon haketuksella. Etuna karkeamurskaukseen terminaalissa tai metsävarastolla tyytymisessä olisi myös se, että tällöin lopullinen murskaus voitaisiin tehdä automatisoidusti järein laittein ja edullisin käyttökustannuksin vasta voimalaitoksella. Tällaisia ratkaisuja ei kuitenkaan ole kovin paljon käytetty muun muassa siksi, että menetelmä ei ole kovin tunnettu ja toteutus edellyttää myös voimalaitokselta investointeja, joiden kannattavuus puolestaan edellyttää urakoitsijoilta toistaiseksi melko harvinaisia esimurskaimia. Karkeamursketta voidaan kylläkin syöttää myös kokonaiselle tavaralle yleensä käytettyihin kiinteisiin voimalaitosmurskaimiin ja siten parantaa niiden kapasiteettia ja pienentää teräkustannuksia.

4 RAAKA-AINEEN SAATAVUUS

Arviot biomassan maailmanlaajuisesta saatavuudesta vaihtelevat hyvin paljon. Tyypilliset arviot vuodelle 2050 ovat suuruusluokkaa 100-200 EJ/a, kun mukana ovat myös pelloilla varta vasten viljeltävät energiakasvit edullisempien metsäteollisuuden sivutuotteiden lisäksi. Myös keskimääräinen ruokavalio vaikuttaa saatavuuteen bioenergiantuotannon kilpaillessa peltopinta-alasta ruuantuotannon kanssa. Kasvisruokavaliolla vastaava arvio on noin 250 EJ ja liharuokavaliolla noin 150 EJ. Kehitysmaiden vaurastuessa liharuoan syönti lisääntynee, joten näin ollen todennäköinen bioenergian globaali saatavuus on luokkaa 150 EJ vuonna 2050. (Koljonen ym. 2009, 55-58 ja Anttila ym. 2009).

Koko maailman primäärienergiankulutus tällä hetkellä on 440 EJ ja vuonna 2050 arviolta 800 EJ. (Koljonen ym. 2009, 17). Näin ollen bioenergialla ei pystyttäne tuottamaan kuin osa maailman primäärienergiankulutuksesta, eikä ole kestävällä pohjalla perustaa Suomen

energiastrategiaa laajamittaiseen tuontiin. Kotimaisten lähteiden saatavuutta on kuvattu seuraavassa.

Metsien koko puubiomassan vuosittainen kasvu on Suomessa noin 150 miljoonaa m^3, joka on energiaksi muutettuna noin 300 TWh. Hakkuut kuorellisena runkopuuna mitaten ovat kaikkiaan noin 60 miljoonaa m^3 vuodessa ja runkopuun kasvu noin 100 miljoonaa m^3 vuodessa. Käytännössä maksimihakkuumäärä on noin 70 miljoonaa m^3, koska suuri osa metsistä on yksityisomistuksessa ja omistajat tai yhteiskunta katsovat muut metsänkäyttömuodot (marjastus, sienestys, vaeltelu, metsästys, vanhojen tai muuten erityismerkityksellisten metsien suojelu tms.) tärkeämmäksi kuin maksimaalisen hakkuumäärän tavoittelemisen. (Elo 2009, Asikainen 2009).

Suurin puuenergian lähde Suomessa tällä hetkellä on selluteollisuuden mustalipeä. Käyttö riippuu täysin selluntuotannon määrästä. Metsätehon ja Pöyryn skenaariossa selluntuotannon määrä vähenee siten, että vuonna 2030 mustalipeän energiasisältö olisi 38 TWh nykyisen 43 TWh:n sijaan (Elo 2009). Vastaavassa suhteessa pienenee myös runkopuun mukana tulevan kuoren määrä. Koska sellunkeitossa noin puolet puusta käytetään energiaksi, tarkoittaa mainittu mustalipeän määrän väheneminen sitä, että kuitupuuta vapautuisi selluteosta energia- tai muuhun käyttöön 10 TWh.

Kyseinen 10 TWh voisi olla saatavissa ohjaamalla puuta esimerkiksi ensimmäistä yleensä kuitupuuta tuottavista hakkuista, ensiharvennuksista, entistä enemmän suoraan energiakäyttöön. Näissä kuitupuun erottelu ei välttämättä kannata vähäisen kertymän vuoksi. Nuorten metsien kunnostuksista jo tälläkin hetkellä tuleva puu menee kokonaisuudessaan energiakäyttöön pienen läpimitan ja erottelun kannattamattomuuden vuoksi.

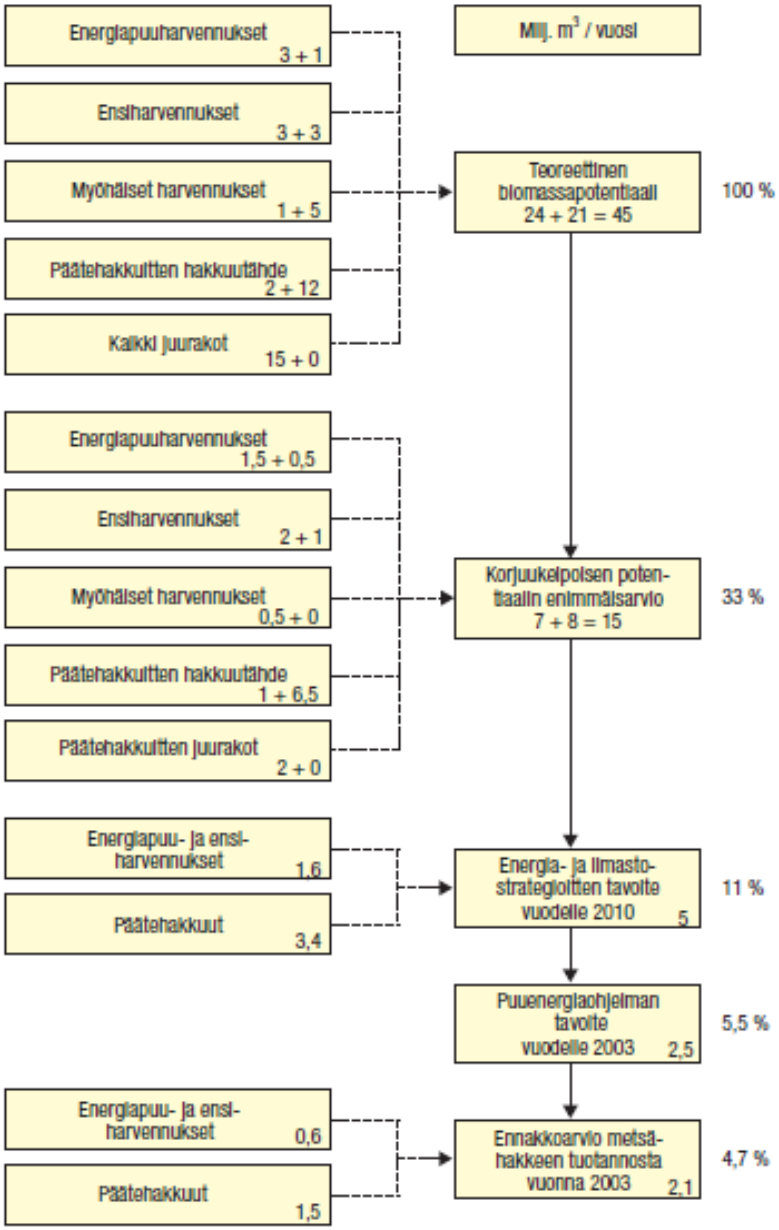
Tavanomaisessa nykymetsänhoitosuositusten mukaisessa, ainespuun tuotantoon tähtäävässä kasvatusmallissa, männikköön jätetään 2000 puuta hehtaarille taimikonhoidossa, josta ei vielä saada korjuukelpoista puuta. Taimikonhoidossa pyritäänkin vain vapauttamaan tilaa kasvatettaville, sahatavaran teon kannalta laadukkaille puille. Taimikonhoitoa seuraa ensiharvennus, jossa puuston valtapituus on 11-13 metriä ja jonka jälkeen puuston runkoluku on noin 1000 kpl/hehtaarilla. (Sirén ym. 2007).

Sekä energia- että ainespuun kasvatukseen tähtäävässä metsänhoitomallissa puusto jätetään taimikonhoidossa tiheämmäksi, 3000-4000 runkoon hehtaarilla. Mukana on myös lehtipuuta muuten havupuuvaltaisessa metsässä. Yhdistetty energia- ja ainespuun korjuu tehdään hieman aiemmin kuin vain ainespuun tuotantoon tähdättäessä, 8-12 metrin valtapituudessa ja jäävä puusto on hiukan tiheämpää, 1300 runkoa hehtaarilla. Puuntuotos koko kiertoaikana on myös energiapuun tuotantoon pyrkivässä mallissa metsätyypistä riippuen 5-30´% enemmän poiskorjattavaa biomassaa tuottava kuin vain ainespuuta kasvatettaessa. (Sirén ym. 2007).

Metsänkasvatuksen vaihtoehtoja on simuloitu energiapuuharvennuksen sisältämän ja perinteisen ainespuun kasvatusketjujen välillä (Karttunen 2006, Karttunen 2010, Heikkilä ym. 2009, Siren ym. 2007). Tulosten mukaan metsänomistajan kannalta energiapuuta tuottava vaihtoehto on kannattavampi, mikäli energiapienpuun kantohinta on männikkökohteissa keskimäärin vähintään 4 €/m^3 (2 euroa/MWh), kun korkokanta on 3 % ja kuusikossa vastaavasti 8-9 euroa/m^3 (4-4,5 euroa/MWh). Hakkaamalla aines- ja energiapuuta samaan aikaan voidaan mainittuja kantohintarajoja saada paljonkin pienemmiksi (Sirén ym. 2007). Tiheämmän energiapuuharvennuksen sisältämälle metsänkasvatukselle on laadittu hyvän metsänhoidon suositukset (Äijälä ym. 2010).

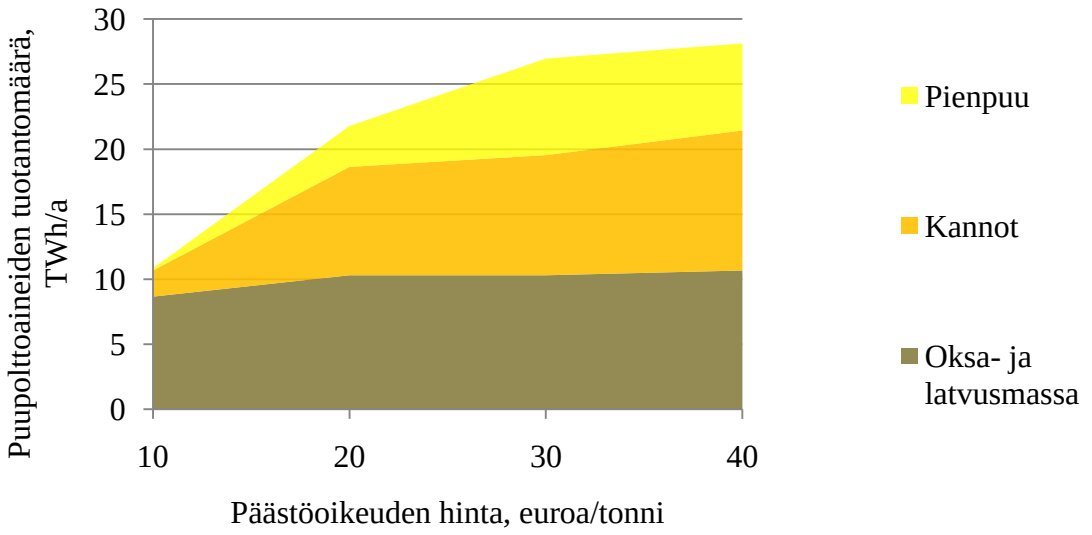
Korjuuteknisesti edullisesti energiapuuta olisi myös saatavissa päätehakkuistakin entistä suuremman latvaläpimitan avulla, toisin sanoen katkaisemalla rungon latvaosa energiapuuksi entistä alempaa. Kaikkia mainittuja puutavaralajeja voidaan kutsua pienpuuksi, jonka hakettamista tai murskaamista tässä työssä erityisesti tarkastellaan.

Metsäenergian lisäpotentiaalia on lisäksi muuhun kuin energiakäyttöön ainakin toistaiseksi kelpaamattomissa uudistushakkuualojen oksa- ja latvusmassassa ja kannoissa. Kaikkien näiden biologista potentiaalia ja siitä edelleen teknis-taloudellis-ekologisesti käyttöön saatavaa potentiaalia esittää kuva 6 (Hakkila 2004).



Kuva 6. *Erikseen kerättävän energiapuun biologinen ja teknis-taloudellis-ekologinen saatavuus (Hakkila 2004). Ensimmäinen luku tarkoittaa kuorellisen runkopuun ja toinen latvusmassan määrää. 1 M m^3 = noin 2 TWh.*

Myös Metsäteho ja Pöyry ovat tehneet arvion käytännössä kerättävissä olevasta metsäenergiamäärästä. Arviossa on otettu huomioon päästöoikeuden hinnan vaikutus, kuva 7 (Elo 2009).



Kuva 7. *Tekniset, taloudelliset ja ekologiset rajoitteet huomioiden korjattavissa olevat energiapuumäärät Suomessa Metsätehon ja Pöyryn mukaan (Elo 2009).*

Kuvassa 7 esitetyssä pienpuun käyttömäärien laskennassa on otettu huomioon Kemera-tuet, noin 5 euroa/MWh. Ellei tukia makseta, käytettävän pienpuun määrä on 1,1 TWh/a vähäisempi, jos päästöoikeuden hinta on 30 euroa/tonni. (Elo 2009). Pienpuussa ei ole mukana merkittävää määrää teollisuuden kuitupuuksi kelpaavaa runkopuuta.

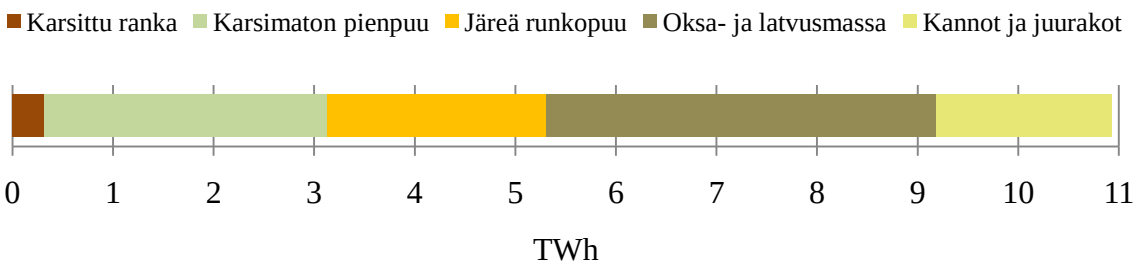
Kuvassa 6 esitettyyn, kerättävissä olevaan kantopotentiaaliin ei ole laskettu mukaan männynkantoja, koska kyseisen julkaisun ilmestyessä vuonna 2004 männynkantojen nostoon ei ollut sopivaa menetelmää. Kuusen juuristo on laakea, pinnallinen, mutta männyllä on paalujuuri, joka tekee noston varsinkin riittävän puhtaana kivistä vaikeaksi. Nyttemmin on kuitenkin kehitetty tekniikka, jolla myös männynkannot saadaan nostettua (Mononen 2009). Tämä lisää metsäenergiapotentiaalia noin 3 TWh, joten se on kokonaisuudessaan noin 33 TWh.

Nämä kaksi arviota (kuvissa 6 ja 7) eroavat toisistaan 3-6 TWh riippuen siitä, otetaanko männynkantoja mukaan. Ero ei kuitenkaan ole merkittävä, kun otetaan huomioon lukuisat ehdot, joilla teknis-taloudellis-ekologista potentiaalia lasketaan biologisesta potentiaalista rajaamalla. Muistisääntönä voidaankin sanoa, että käytännön metsäenergiapotentiaali Suomessa on noin 30 TWh, jakaantuen likimain tasan oksa- ja latvusmassalle, kannoille ja pienpuulle. Tässä eivät siis ole mukana metsäteollisuuden sivutuotteiksi katsottavat runkopuun kuori, sahanpuru ja sellunkeiton mustalipeä.

Ero teoreettisen biomassapotentiaalin ja käytännössä korjattavissa olevan välillä on huomattava, jälkimmäinen on vain kolmas-neljäsosa edellisestä. Syitä tähän ovat mm. seuraavat:

- Oksa- ja latvusmassaa saadaan kerättyä edullisimmin uudistushakkuukuusikoista. Männiköissä ja harvennuksilla kertymä on pienempi ja ravinnetappioilla on suurempi merkitys kuin uudistushakkuilla. Harvennuksissa myös korjuuvaurioiden riski kasvaa tähteiden keruussa.
- Niukkaravinteisilta, kuivilta, hyvin vettä läpäiseviltä ja ohuen humuskerroksen mailta ei kerätä energiapuuta mahdollisen maaperän köyhtymisen ja eroosion vuoksi. Humuskerroksen ohenemisen vaara on lähinnä karuilla kankailla (von Arnold 2006).
- Kantoja ei nosteta harvennuksilta, koska puustovaurioiden vaara on ilmeinen
- Kaikkea biomassaa ei pyritäkään saamaan talteen korjuukohteilta. Noin kolmasosa oksista, latvoista ja kannoista jää maastoon sekä ekologisista että taloudellisista syistä. Myös pienimmät yksittäiset puut (esimerkiksi alle 4 cm rinnankorkeusläpimitaltaan) jäävät harvennuksilla korjaamatta samoista syistä.
- Alueilta, jolla muutenkaan ei ole suositeltavaa harjoittaa intensiivistä metsätaloutta, ei tule kerätä energiapuuta. Tällaisia paikkoja ovat mm. puronvarret, lehdot ym.
- Maastoon kivisyys voi rajoittaa korjuuta
- Kaikki metsänomistajat eivät anna korjuulupaa metsäenergialle (myyntihaluttomuus)

Metsähakkeen käyttö Suomessa lämpö- ja voimalaitoksissa vuonna 2009 oli 5,4 miljoonaa m^3 eli noin 11 TWh. Se jakaantui kuvan 8 mukaisesti. (Ylitalo 2010). Lisäksi pientaloissa käytettiin 1,4 TWh.



Kuva 8. *Metsähakkeen käyttö raaka-aineittain lämpö- ja voimalaitoksissa Suomessa vuonna 2009 (Ylitalo 2010). Järeä runkopuu oli pääosin tuontipuuta, muut kotimaista.*

Keski-Suomen Metsäkeskuksen alueella tehdyn arvion perusteella esimerkiksi uudistushakkuualojen oksa- ja latvusmassan määrää rajoittavat seuraavan taulukon mukaiset tekijät (Kauppinen 1996). Uudistushakkuista tulevaa kokonaismäärää on merkitty suhdeluvulla 100. Tulos ei sinänsä ole tarkasti yleistettävissä koko maahan, mutta suuntaa-antava se on.

- Kaikki oksa- ja latvusmassa uudistushakkuualoilta	100
- Ravinneisuus, tuore kangas ja paremmat	85
- Kuusivaltaiset kuviot	72
- Korjuusaanto, 65%	47
- Kertymä, >35 kiinto-m^3/ha	45
- Maastoluokat 3 ja 4 (korjuulle hankala maasto), 2 % alasta	44
- Haittaava aluskasvillisuus, 10% alasta	40
- Kulotusalueet, 3% alasta	38
- Metsänhoitosuositukset, 1% alasta	38
- Välivarastohävikki, 4%	37
- Myyntihalukkuus, arviolta 20% ei anna korjuulupaa	29

Alkuperäisessä arviossa olivat rajoitteina vielä polttoaineen maksimihinta toimituspaikalle ja minimikertymä koko kuviolta, mutta tässä ne on jätetty pois, koska nykytekniikalla kustannuksia on saatu pienennettyä, voimalaitosten maksukyky on entistä suurempi ja terminaalien käyttö mahdollistaa pientenkin erien keräilyn. Näiden rajoitteiden vaikutus olisi ollut noin 2 %-yksikköä.

Metsäomistajien myyntihalukkuuteen vaikuttavat mm. kantohintaodotukset, eri käsittelyvaihtoehtojen tunnettuus, aktiivisuus metsänhoidossa yleensä, virkistysarvot, luonto- ja maisema-arvot ja myös mahdolliset pelot ravinne- ja kasvutappioista kokopuun korjuun seurauksena. Viimeksimainittu on kuitenkin sikäli turha pelko, että kasvutappio on käytännössä vähäinen. Se on kuitenkin merkittävimpiä syitä myyntihaluttomuuteen yleisen tiedon puutteen lisäksi, joten asiasta tiedottaminen olisi tarpeen. Pienpuulla metsänomistajien myyntihalukkuus on noin 75%, oksa- ja latvusmassalla 80% ja kannoilla 50%. (Ranta ym. 2010, 3).

Jacobsonin ym. (2000) mukaan männikön kokopuukorjuu nuoren metsän kunnostuksessa vähensi vuosittaista runkopuun keskikasvua koko kiertoajalla vain vähän, 0,09 m^3/ha/a. Jos

40% oksista ja latvoista jätettiin maahan, kuten käytännössä helposti tapahtuu, kasvutappio oli vain 0,03 m^3/ha/a. Kasvutappio johtuu puuston käytettävissä olevan typen vähenemisen vuoksi ennen kaikkea neulasten mukana.

Kasvutappio voidaan kompensoida joko rahallisella korvauksella tai lannoittamalla. Lannoitukseen voidaan käyttää keinolannoitteita tai tuhkaa. Mitä suurempi on puun osuus polttoaineesta, sitä parempaa tuhka on tähän tarkoitukseen. Tuhka voidaan käsitellä lannoitukseen sopivaksi edullisella itsekovetusmenetelmällä tai teollisempaa tuotetta haluttaessa kuljettaa tuhkankäsittelylaitokseen muualle. Tuhkakuljetuksissa voi käyttää mahdollisuuksien mukaan meno-paluu-kuljetuksia, toisin sanoen tuhkaa pois laitokselta, polttoainetta samalta suunnalta takaisin laitokseen, etenkin jos metsähakkeen toimitukset tapahtuvat terminaalien kautta.

Jos korvaus hoidetaan rahalla ja oletetaan diskonttauskorko samaksi kuin nimellisten kantohintojen nousu, mainittu 0,03 m^3/ha/a kasvutappio merkitsisi nuoren metsän kunnostuksesta tuotetun polttoaineen hinnassa 60 vuoden kiertoajalla 54 senttiä/MWh. Tämä siis hakkeen ostajan pitäisi maksaa metsänomistajalle korvauksena ravinnetappiosta. Laskelma pätee, jos keskimääräinen kantohinta ainespuulle on 30 e/m^3 ja energiapuun saanto kunnostuksesta 50 m^3/ha.

5 METSÄENERGIAN TUOTANTOKETJUT

Puupolttoaineen toimitusketjun tulee olla sellainen, että polttoaine tulee laitoksella oikeaan aikaan, sopivassa kosteudessa ja palakoossa ja muihin polttoaineisiin nähden kilpailukykyisin kustannuksin. Suomessa tyypillisiä piirteitä ja toimitusketjun suunnittelussa huomioonotettavia ovat muun muassa seuraavat asia (Hakkila 2003, 59-60):

- metsänomistajista suurin osa on yksityishenkilöitä ja kerralla korjattavat kohteet ovat pieniä, yleensä korkeintaan joitakin satoja MWh:ja kerrallaan, joten hankinnan organisointi on siksi vaativaa
- oksa- ja latvusmassan ja kantojen hankintamahdollisuudet riippuvat täysin uudistushakkuiden määrästä
- osaavasta työvoimasta on ajoittain pulaa

- korjuuyritykset ovat useimmiten pieniä
- polttoaineen käyttö on kesällä huomattavasti vähäisempää kuin talvella
- korjuun tulee olla ekologisesti kestävällä pohjalla
- varsinkin suuremmilla laitoksilla käytetään myös muita polttoaineita, kuten metsäteollisuuden sivutuotteita ja turvetta

Metsäenergian toimitus laitokselle koostuu seuraavista työvaiheista:

- pienpuun hakkuu, oksa- ja latvusmassan hakkuu kasoille ainespuukorjuun yhteydessä tai kantojen nosto
- metsäkuljetus tienvarsivarastolle (välivarastolle)
- autokuljetus tienvarsivarastolta terminaalille tai voimalaitokselle tarvittaessa
- haketus tai murskaus tienvarsivarastolla, terminaalilla tai käyttöpaikalla
- hakkeen tai murskeen auto-, juna- tai aluskuljetus tarvittaessa

Yleensä tuotantoketjut jaetaan ja nimetään haketuspaikan mukaan välivarasto-, terminaali- tai käyttöpaikkahaketusketjuiksi. Mitä myöhemmin haketus tai murskaus tehdään, sitä suuremmilla laitteilla ja vähemmän työvoimaa vaatien se voidaan tehdä ja näin päästä hyötymään mittakaavaedusta, jos toimitusmäärät ovat riittävän suuria. Toisaalta käsittelemättömän energiapuun kuljetus on 1,5-2 kertaa niin kallista kilometriä kohden kuin hakkeen tai murskeen kuljetus. Kaikille ketjuille on siis sopivat, omat käyttökohteensa tilanteen mukaan.

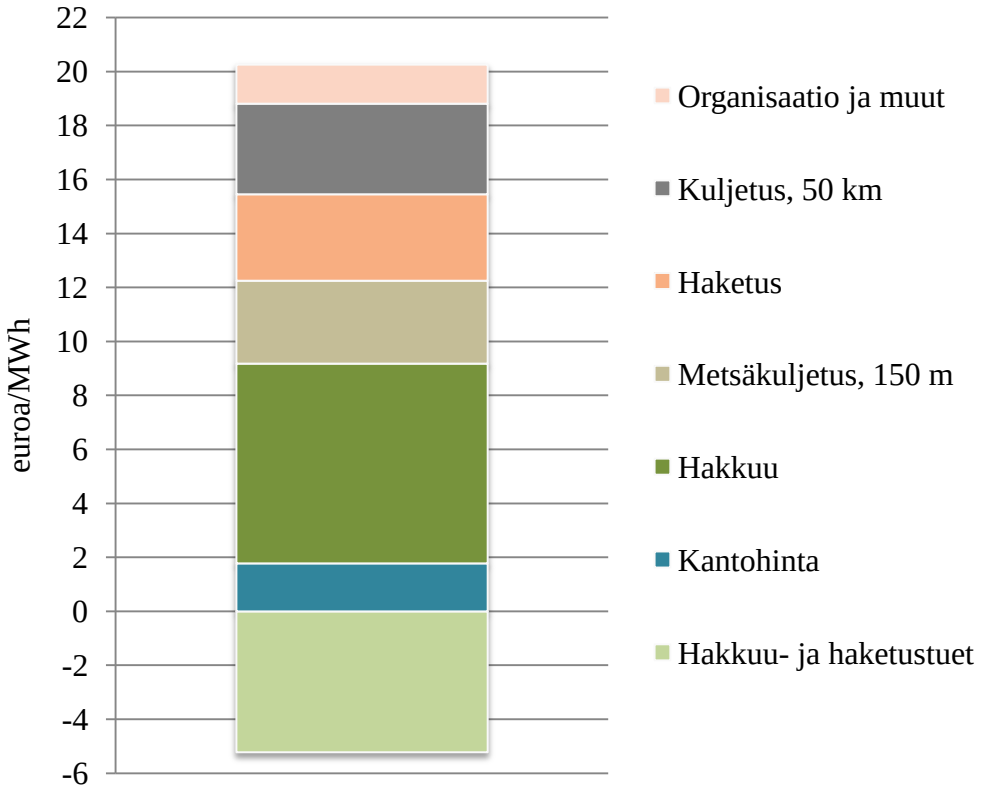
Tuotantomenetelmän valintaan vaikuttavat mm. seuraavat asiat (Rinne 2005, 6):

- menetelmällä tuotetun polttoaineen välittömät tuotantokustannukset
- menetelmän sopivuus muihin käytössä oleviin järjestelmiin ja tunnettuus yrittäjien keskuudessa
- tuotetun polttoaineen riittävän hyvä laatu
- tuotetun polttoaineen toimitusvarmuus
- yleiskäyttöisyys, ts. mahdollisuus vaihtaa toimintatapaa olosuhteiden vaihtuessa
- laitteiden toimintavarmuus ja yhden koneen häiriöiden heijastuminen koko ketjuun
- menetelmän aiheuttamat ympäristöhaitat (esim. melu, pöly, teiden roskaantuminen)

Lyhyillä kuljetusmatkoilla edullisin menetelmä on käyttöpaikalla murskaus, mutta silloinkin sen käyttöä voivat rajoittaa murskaimelle sopivan paikan puute voimalaitoksella tai pienien kuormien myötä lisääntyvän liikenteen aiheuttamat haitat. Välivarastohaketus on perinteisesti käytetyin menetelmä ja yhä toimiva ja kilpailukykyinen varsinkin keskipitkillä matkoilla tai pienempien laitosten yleismenetelmänä. Terminaaleja käytetään lähinnä haluttaessa tehdä helposti saatavilla olevia puskurivarastoja tai pitkien kaukokuljetusmatkojen (yli 100…150 km) ollessa kyseessä.

Yleisenä suuntauksena on ollut haketuksen tai murskauksen painopisteen siirtyminen kohti käyttöpaikkaa. Tähän ovat vaikuttaneet muun muassa yhä suuremmat laitoskohtaiset käyttömäärät, kaukokuljetuskaluston suureneminen, investoinnit tehokkaisiin voimalaitosmurskaimiin ja halu parantaa toimitusvarmuutta. Pienpuusta kuitenkin yhä 80% haketetaan tienvarsivarastolla (Kärhä 2009).

Kustannusesimerkkinä kuvassa 9 on esitetty eri vaiheiden keskimääräisiä kustannuksia pienpuun välivarastohaketukseen perustuvassa tuotantoketjussa (Korpinen ym. 2008).



Kuva 9. *Pienpuun välivarastohaketukseen perustuvan puupolttoaineentuotantoketjun keskimääräisiä kustannuksia (Korpinen ym. 2008).*

6 HAKETUS- JA MURSKAUSTEKNIIKKA

Murskaimet ja hakkurit voidaan luokitella syöttötavan tai terärummun tai -laikan kierrosnopeuden mukaan. Syöttötavan perusteella jaoteltuna laitteita on kaksi päätyyppiä: pystysyöttöiset ja vaakasyöttöiset. Roottorin kierrosnopeudet ovat energiapuulle tarkoitetuissa laitteissa 20 - 2000 kierrosta minuutissa. Hidaskäyntisissä laitteissa kierrosluku on alle 100, nopeakäyntisissä yleensä yli 600 kierrosta minuutissa.

Vaakasyöttöisissä hakkureissa tai murskaimissa syöte työnnetään vaakasuorassa suunnassa roottorille tavalla tai toisella. Syöttölaitteen lähtökohtana on se, että aivan terärummun tai -laikan edessä on sekä ylä- että alapuolella rullat tai muut vastaavat syöttöelimet, kuva 10. Nämä puristavat mahdollisesti harottavan taakan syöttöaukkoon sopivaksi ja työntävät tavaran roottorille hallitusti. Rullilla tai vastaavilla voidaan myös vetää taakka pois roottorin ulottuvilta ylikuormitus- tai tukostilanteessa tai havaittaessa juuri haketettavaksi tai murskattavaksi menossa olevassa taakassa kiviä, rautaa tms.

Kuva 10. *Peterson-vaakasyöttömurskaimen yläsyöttörulla ylös nostettuna. Työskenneltäessä rulla painaa puita alapuolista ketjukuljetinta vasten ja nämä yhdessä syöttävät tavaraa roottorille, joka tässä tapauksessa pyörii syötön kohdalla ylöspäin, kuten murskaushampaista voidaan päätellä. Useimmiten roottorit pyörivät kuitenkin ”alaspäin”. Kuva SR.*

Vaakasyöttöisen hakkurin tai murskaimen syöttökuljettimeksi sopivat esimerkiksi hihnakuljetin, teräslamellikuljetin tai ketjukuljetin. Kaikkia käytetään, eikä paremmuutta voi yksiselitteisesti määritellä. Hakkureissa yleisiä ovat ketju- tai lamellikuljettimet, joissakin murskaimissa käytetään hihnakuljetinta.

Pystysyöttöisissä laitteissa syöte tuodaan useimmiten hihnakuljettimella, joka pudottaa tavaran syöttökuiluun. Syöte putoaa kuilussa vapaasti roottorille. Tämä syöttötapa sopii parhaiten suhteellisen pienelle ja notkealle syötteelle, esimerkiksi kuorelle. Mitä kookkaampaa ja holvaantuvampaa syöte on, sitä vaikeampaa sitä on saada taittumaan kuilusta alas. Hidaskäyntiset murskaimet ovat myös pystysyöttöisiä, mutta niissä syöttöaukko on niin suuri, esimerkiksi 3 * 4 metriä, että oksat, kannot, pienpuu ym. mahtuvat putoamaan roottoreille holvautumatta.

Kaukalomurskain, kuva 11, on tavallaan pystysyöttöisen murskaimen erikoistapaus, sillä kaukalomurskaimessakin tavara tulee roottorille ylhäältäpäin. Syöttökuilu on laajennettu itse roottoria huomattavasti suuremmaksi kaukaloksi. Murskainroottori on kaukalon pohjalla. Kaukalon seinät muodostava lieriö pyörii ja siinä olevat siivekkeet työntävät murskattavaa tavaraa roottorille. Epämääräisenmuotoisen tavaran syöttäminen on helppoa ja nopeaa, mutta pitkän tavaran hankalaa. Siksi kaukalomurskain sopii parhaiten kannoille ja oksa- ja latvusmassalle. Pienpuu sopii paremmin vaakasyöttöisiin laitteisiin.

Kuva 11. *Morbark-kaukalomurskain. Murskattavana on risutukkeja ja ruokohelpiä. Kuva SR.*

Hakkureita ja murskaimia on eri kokoluokissa pienistä, käsinsyötettävistä, traktorin nostolaitteeseen kiinnitettävistä laikkahakkureista suuriin, kiinteisiin murskaimiin (esimerkiksi voimalaitosten hidaskäyntiset murskaimet) asti. Suurien ja tehokkaiden laitteiden käytössä on pienempiin mm. seuraavia etuja ja haittoja:

+ käyttäjän työvoimakustannukset pienenevät tuottavuuden noustessa
+ suoraan autoon haketettessa autojen viipymäaika pienenee tuottavuuden noustessa
+ epäpuhtailla ja hankalasti syötettävillä materiaaleilla, kuten kannoilla, laitteen on käytännöllisesti katsoen pakko olla varsin suuri ja järeä, jotta se kestäisi epäpuhtaan materiaalin aiheuttamat rasitukset ja päästäisiin edes kohtuullisiin tuottavuuksiin.
+ mitä nopeammin haketus tai murskaus käy, sitä vähemmän aikaa se on häiritsemässä ympäristöä

- suuren hakkurin tai murskaimen kanssa ei pääse kaikille varastopaikoille tieolosuhteiden rajoittaessa kulkua
- varastopaikat ovat usein ahtaita, joten kookkaan hakkurin ja hakeauton on hankala sopia toimimaan yhdessä
- suuri investointi vaatii tehokasta käyttöä
- haketettavaa materiaalia on usein vähän paikassaan, joten hakkuri joutuu usein odottamaan hakeautoa, vaikka haketta olisi tulossa enää vain nuppikuormallinen. Mitä kalliimpi hakkuri, sitä kalliimmaksi ylimääräiset odotukset käyvät.

Suuren laitteen ongelmia voidaan helpottaa keskittämällä haketusta paremmille paikoille ja suuremmille varastoille. Äärimmillään keskittäminen toteutuu silloin, kun hakkuri on voimalaitoksella. Pienemmillä paikoillakin haketettaessa voidaan varastoja yhdistää terminaaleiksi ja näin tehostaa toimintaa.

6.1 Laikkahakkuri

Laikka- eli kiekkohakkurissa on teräkiekko, johon on kiinnitetty säteen suuntaisia tai hieman tangentiaalisia, suoria teriä. Puut syötetään vinossa asennossa kohti kiekkoa, jolloin terät lastuavat puuta. Hake menee terien kohdalla olevista aukoista teräkiekon läpi ja pu-

halletaan ulkokehältä tangentin suuntaisesti eteenpäin kiekon takapuolella olevien siipien vauhdittamana.

Laikkahakkuri on yksinkertainen rakenteeltaan, mutta terät ovat arkoja epäpuhtauksille ja pitkät oksat pääsevät helposti läpi, jos ne ovat lähellä terän suuntaa. Näin ollen laikkahakkuri sopii parhaiten pieniin sovelluksiin ja toisaalta laadukkaan selluhakkeen tms. tekoon kuoritusta puusta suurilla laitteilla massanvalmistusteollisuudessa.

6.2 Rumpuhakkuri

Rumpuhakkurissa, kuva 12, terät ovat lieriömäisen rummun ulkokehällä. Rummun leveys on energiapuuhakkureissa yleensä 70-150 cm ja halkaisija 70-130 cm. Terät voivat olla koko rummun levyisiä tai lyhyempiä, spiraalimaisesti ympäri rumpua sijoiteltuja. Terät leikkaavat puusta haketta, joka jää aluksi haketaskuihin terän taakse ja putoaa niistä rummun alle, josta se erillisillä puhaltimilla tai kuljettimilla siirretään eteenpäin, tai vaihtoehtoisesti rumpu haketaskuineen itsessään toimii puhaltimena heittäen haketta ylöspäin.

Terät leikkaavat puuta aluksi vasten vastaterää, joka on rummun etu- ja alapuolella oleva palkki. Tämän jälkeen on rummun kehän suuntaisesti yleensä seulaverkko, jota vasten lopullinen palan muodostuminen tapahtuu. Seulan silmäkokoa muuttamalla voidaan hakkeen palakokoa säätää, joskin siihen vaikuttavat myös syöttönopeus, terien määrä ja rummun kierrosnopeus. Laitteet ovat nopeakäyntisiä eli rumpu saa käyttövoimansa moottorilta kiilahihnoilla tai vastaavilla.

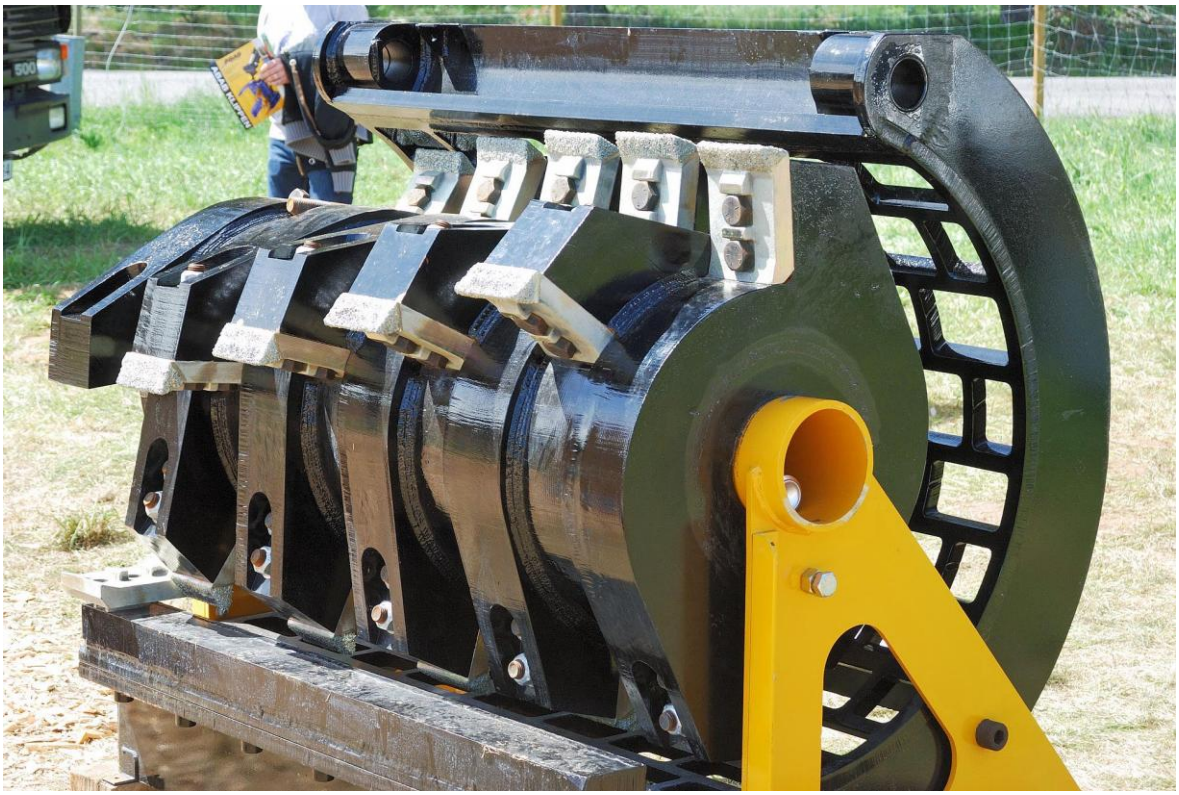
Lähes kaikki suuret energiapuuhakkurit ovat Suomessa rumpuhakkureita. Niihin saa tehtyä suuremman syöttöaukon kuin laikkahakkureihin eikä terähuolto ole yhtä tarkkaa ja lisäksi pitkien oksanpalasten välttäminen hakkeessa on tärkeää varsinkin pienille laitoksille.

Kuva 12. *LHM Giant-rumpuhakkuri. Vasemmalla syöttöpöytä, levikkeet avattuna. Yläsyöttörullan pääty näkyy keltaisena ja sen oikealla puolella on hakkurirummun kiilahihnakäyttö. Hakkuria käytetään nostettavasta ohjaamosta, jonka alla on oma moottori hakkurille. Tämän oikealla puolella hakepuhaltimen torvi. Hakepuhaltimet ovat vinossa asennossa hakkurin alla. Kuva SR.*

6.3 Vasaramurskain

Vasaramurskaimet muistuttavat rakenteeltaan rumpuhakkuria. Erona on se, että materiaali hienonnetaan tylpillä murskaushampailla hakkurin terävien terien sijaan ja yleensä rakenne kokonaisuudessaan on järeämpi. Järeyden vuoksi murskaimet ovat mobiiliversioina yleensä puoliperävaunualustataisia ja varsin kookkaita, eikä niillä ole helppo toimia ahtailla metsävarastoilla. Murskaimet sopivatkin parhaiten terminaalityöskentelyyn.

Terät eivät ole koko rummun levyisiä, kuten rumpuhakkureissa joskus, vaan ne ovat kehällä porrastetusti 1-30 cm:n levyisinä. Vastaterä ja seulaverkko ovat käytössä samaan tapaan kuin rumpuhakkureissa, kuva 13. Monissa murskaimissa vastaterä ja seula ovat asennetut siten, että paksun raudan tai vastaavan joutuessa murskaimeen seulaa ja vastaterää paikallaan pitävät murtotapit katkeavat ja näin rajoittavat tapahtuvan vahingon pieneksi.



Kuva 13. *CBI-murskaimen roottori, vastateräpalkki ja seulaverkko. Huomaa ”terien” hieman hakkurin terää muistuttava muoto. Erona on tässä karkea kovahitsauspinnoite hakkurin sileän terän sijasta. Murskaimen ”teriä” ei teroiteta, vaan pinnoite uusitaan täytehitsauksella. Kuva SR.*

Vasarat ovat joskus nivelöityjä, toisin sanoen ne pääsevät vapaasti pyörimään kiinnitystankonsa ympäri. Keskipakovoima pitää vasarat ulossuuntautuneina roottorin pyöriessä. Esteen, kuten kiven, kohdatessaan vasarat pääsevät kääntymään taaksepäin ja säästyvät näin pahemmilta vaurioilta. Järeää puuta murskattaessa heiluvat vasarat eivät välttämättä ole hyvä ratkaisu, koska ne myötäävät tarpeettomasti riittävän paksun puun kohdatessaan. Tällöin puu ei leikkaannu, vaan vain tyssääntyy, mikä lisää energian- ja teränkulutusta, huonontaa kapasiteettia ja vaikeuttaa paksun puun murskaamisessa ylipäätään. Toisaalta heiluvateräinen murskain pystytään rakentamaan kevyemmäksi kuin kiinteäteräinen, joten sillä toiminta metsävarastoillakin on mahdollista.

6.4 Hidaskäyntinen murskain

Suomalaistyyppisissä, BMH:n tai Raumasterin hidaskäyntisissä kiinteissä tai puolikiinteissä murskaimissa murskattava tavara putoaa alas pystysuorassa metrin-parin kuilussa ja hienontuu joutuessaan roottoriin kiinnitettyjen terien ja vastateräkamman väliin (kuva 14). Seulaverkkoa ei yleensä ole, joskin se on mahdollinen pitkien tikkujen määrän rajoittamiseksi nopeakäyntisten tapaan. Pyörimisnopeus on 8-30 kierrosta minuutissa, puun ollessa kyseessä lähempänä kolmeakymmentä. Terät ovat suomalaisissa laitteissa yleensä irrotettavia, jolloin teräpala joko käännetään, täytehitsataan tai vaihdetaan uuteen. Terät ovat leijukattiloihin sopivaa polttoainetta tehtäessä leveydeltään noin 5 cm.

Laitteita on 1- ja 2-roottorisia. 1-roottorinen ei pienen syöttöaukkonsa vuoksi sovellu kovinkaan hyvin energiapuun murskaukseen. Syöttöaukon tulee olla kooltaan vähintään suuruusluokkaa 2-3 * 3-4 metriä. Tämän kokoluokan laitteet ovat 2-roottorisia.

Käyttö voi olla hydraulinen tai mekaaninen. Mekaaninen käyttö sopii parhaiten kevyelle tavaralle, mutta metsästä kerättyä energiapuuta käsittelevät laitteet ovat yleensä hydraulikäyttöisiä huomattavasti kalliimmasta hinnastaan huolimatta. Hydraulisella käytöllä saavutetaan suurempi kapasiteetti ja parempi suoja murskautumattomia kappaleita vastaan.

6-7-metrisen pienpuun syöttö näihin murskaimiin voi olla ongelma, koska puut pitäisi saada putoamaan roottoreille niiden suuntaisesti. Ongelma voidaan hoitaa katkomalla puut lyhyemmäksi jo metsässä, joka tosin voi lisätä kustannuksia paljonkin. Toinen tapa hoitaa asia on tehdä uusiin murskaimin nykyisiä pidemmät roottorit. Raumasterilla onkin juuri pienpuita silmälläpitäen 5,7 metriä pitkillä roottoreilla varustettu malli. Tätä kirjoitettaessa toimivia esimerkkejä kyseisestä leveästä mallista ei kuitenkaan vielä ole. (Anttonen 2010).

Syöttölaitteena hidaskäyntisissä murskaimissa on yleensä askel- eli palkkisyötin. Siinä on vierekkäin noin 30 cm:n levyisiä palkkeja, joita liikutetaan hydraulisylintereillä edestakaisin siten että palkit liikkuvat taaksepäin yksi kerrallaan mutta eteenpäin kaikki yhdessä. Tämä työntää syötettävää tavaraa eteenpäin. Palkkisyöttimelle voidaan purkaa koko autokuorma kerrallaan puskurivarastoon, mikä on hidaskäyntisen murskaimen merkittävä etu nopeakäyntisiin verrattuna.

Kuva 14. *Hidaskäyntinen Raumaster-murskain. Tavaraa tuova auto ajaa kuvan vasemmassa reunassa näkyvän seinämän taakse ja purkaa kuorman omalla kuormaimellaan ”palkille”. Palkkisyöttimen, joka toimii puskurivarastona, pää näkyy kuvan keskellä. Palkit ovat kuvanottohetkellä olleet takimmaisessa asennossaan. Terät menevät murskaimen keskellä ja reunoilla olevien sormimaisten vastateräpalkkien (alaoikealla) väleistä. Kuvassa olevien ruokohelpipaalien pituus ja halkaisija on 1,2 metriä. Kuva SR.*

7 KUSTANNUKSET LAJEITTAIN

7.1 Haketuksen tai murskauksen tuottavuus

7.1.1 Tuottavuuteen vaikuttavat asiat

Hakkurin tai murskaimen tuottavuus määräytyy sen mukaan, mikä ensimmäisenä rajoittaa läpimenoa, toisin sanoen on pullonkaulana. Se voi olla jokin seuraavista:

1. Tavaran siirto syöttökuljettimelle, esimerkiksi puutavarakuormain
2. Syöttölaite, esimerkiksi alapuolinen ketjukuljetin ja yläpuolinen syöttörulla. Näiden tulee saada ote syötettävästä materiaalista ja pakottaa se syöttöaukkoon. Materiaali voi myös pudota painovoimaisesti terille, jolloin määräävä tekijä on syötteen koko ja holvautuvuus suhteessa syöttöaukon kokoon.
3. Itse leikkaustapahtuma, puun hienontuminen terän ja vastaterän välissä. Määräytyy puun leikkauslujuuden, häviöiden (esim. kitka-) ja moottoritehon mukaan.
4. Haketaskujen täyttyminen tai mahdollisen pohjaseulaverkon läpäisy
5. Valmiin tuotteen kuljetin

Puuhakkureita ja -murskaimia syötetään yleensä puutavarakuormaimella. Laitteet voivat olla muuten samoja kuin pyöreän puutavaran käsittelyssä, mutta koura on hakkureissa yleensä piikkimallinen. Siinä ei ole leukoja yhdistäviä huulilevyjä. Tällä estetään kivien ja maa-aineksen tuleminen varastokasoista syöttötaakkoihin kasojen pohjia kouraistaessa. Piikkikoura myös tunkeutuu joihinkin materiaaleihin paremmin kuin puutavarakoura. Toisaalta karsitun pienpuurangan ja muun oksattoman pyöreän puun käsittelyssä piikkikoura voi olla hankala, sillä leukojen kärjet tökkäävät puuhun eivätkä sujahda puiden välistä siten kuin puutavarakouran leuat. Yksi välimuoto on Ruotsissa kehitetty A-koura, jossa leukojen välilevyt ovat vinossa leukoihin nähden. Ratkaisu on oksa- ja latvusmassalla ja pienpuun käsittelyssä toimintaa nopeuttava, mutta kannoille tällainen koura ei sovi.

Syötön tuottavuutta voi ajatella esimerkiksi kourataakakoon ja aikayksikössä syötetyn taakkamäärän tulona. Taakkakokoa rajoittavat kouran koko, kuormaimen nostokyky, syöt-

tökidan koko ja syöttölaitteen tehokkuus. Hakkurisovelluksissa näistä ensimmäisinä tulevat yleensä vastaan syöttöaukon koko ja syöttölaitteen tehokkuus.

Taakkakoko kuormattaessa osapuuta autoon on Oijalan (1991) mukaan ollut noin 0,7 - 1,3 MWh. Tällainen taakka painaa tyypillisessä 40% kosteudessa 250-450 kg. Tyypillinen 100 kNm:n kuormain jaksaisi ääriulottumallaan (vajaa 10 metriä) nostaa kouran ja kääntäjän paino (noin 300 kg) huomioiden 700 kg:n taakan, mutta käytännössä olisi varsin hidasta pyrkiä aina ottamaan suurin mahdollinen taakka yritys-erehdys-menetelmällä. Puiden oksat voivat lisäksi olla toisissaan kiinni siten, että kasasta nostettaessa voimaa tarvitaankin paljon taakan painoa enemmän. Siksi on hyvä käyttää taakkakokona laskelmissakin esimerkiksi puolta tai kahta kolmasosaa teoreettisesta nostokapasiteetista. Hakkurin kyseessä ollen on lisäksi huomioitava, että sitä voi joutua syöttämään pienemmilläkin taakoilla syöttölaitteen rajoitteiden vuoksi. Tästä syystä kouran ei myöskään kannata olla kovin suuri.

Talvella jäisestä kasasta otettaessa kuormaimen nostovoima voi loppua kesken. Jäätyneet puut voivat olla toisiinsa niin tiukasti kiinnittyneitä, että kasaa joudutaan purkamaan lähinnä repimällä, ei nostamalla. Ilmiö esiintyy lähinnä peittämättömissä kasoissa silloin kun lämpötila vaihtelee nollan molemmin puolin.

Kasoja saatetaan peittää muutenkin, jos kesällä kuivunutta puuta käytetään vasta talvella. Hillebrandin (2004) tutkimuksessa peitettyjen pienpuukasojen kosteus oli talvella keskimäärin 36%, kun se peittämättömissä kasoissa oli 42%. Peittämisen kustannus oli noin 50 snt/MWh. Pienemmästä kosteudesta tuleva hyöty veden haihduttamiseen poltossa kuluvan energian vähenemisenä on noin 40 snt/MWh, jos polttoaineen hinta on 18 euroa/MWh. Lisäksi on kuitenkin huomioitava mahdollisesti suurempi kaukokuljetuskuorman koko. Sen hyöty tässä tapauksessa on 80 kilometrin matkalla 20 snt/MWh, jos paino rajoittaa kuormakokoa. Näin ollen peittäminen voi olla suositeltavaa jo muistakin syistä kuin hakkurin syötön tuottavuuden kannalta.

Taakkakohtainen aika syötössä voi olla esimerkiksi 15-30 sekuntia. Se riippuu kuormainhydrauliikan tuotosta, kuljettajan taidosta, kasan ja syötteen laadusta, syötön avustamisen tarpeellisuudesta ja kasan sijainnista hakkuriin nähden.

Purettaessa oksa- ja latvusmassaa tai karsimatonta pienpuuta kasaan tai hidaskäyntisen murskaimen syöttöpöydälle on tuottavuus suomalaisissa olosuhteissa ollut noin 200-250 MWh/tehotunti. Tämä koskee täydestä kuormasta ottamista, lavan pohjan siivous mukaan lukien tuottavuus on pienempi. Noin 250 MWh:a tunnissa voikin pitää likimääräisenä yläarajana kuormaintyöskentelyn tuottavuudelle energiapuun käsittelyssä silloin, kun puu on kohtuullisen yhdensuuntaista, puut eivät ole jäätyneitä toisiinsa kiinni, kuljettaja on taidoiltaan tavanomainen ja kuormain on normaalikokoinen energiapuuautoissa ja hakkureissa käytetty, nettonostomomentiltaan noin 100 kNm.

Syöttölaitteen tuottavuutta on mitattu erikseen Leinosen ym. (1998) tutkimuksissa. Koelaite vastasi keskikokoisen mobiilihakkurin syöttölaitetta. Pelkän syöttölaitteen tehoaikatuottavuudeksi saatiin karsimattomalla ensiharvennuspuulla noin 110 MWh/h syöttönopeudella 0,5 m/s. Tässä tapauksessa kuormain oli syötön heikoin lenkki. Syöttöpöytä pyöri tyhjänä noin 40% ajasta, joten teoriassa syöttöpöydän tuottavuus olisi ollut noin 180 MWh/h, jos kuormaimen kapasiteetti ei olisi sitä rajoittanut. Tutkimuksen tekijät toteavat, että kuormaintyöskentelyn tuottavuutta voisi parantaa tekemällä hakkurista syöttöpöytineen kääntyvä, jolloin se voitaisiin saada aina puiden suuntaiseksi ja puiden siirtomatka kasasta pöydälle olisi mahdollisimman lyhyt. Nykyään tällaisia ratkaisuja on kaupallisesti saatavanakin.

Kun syöttöpöydän perässä oli hakkuri, tuottavuus oli vain 65 MWh/h hakkurin kapasiteetin rajoittaessa syöttöä. Tällöin syöttölaite pyöri tyhjänä 50% tehoajasta.

Varsinainen haketus voi asettaa rajan tuottavuudelle, jos moottoriteho loppuu kesken tai hakkurista ei fyysisesti mahdu menemään haketta läpi. Nämä voivat tulla vastaan tavanomaisesti mitoitetuissa laitteissa lähinnä karsittua runkopuuta käsiteltäessä. Erityisesti tylsät terät voivat johtaa sen verran suureen tehontarpeeseen, että moottoriteho alkaa rajoittaa tuottavuutta. Tehontarpeesta on enemmän luvussa 7.6.

Valmiin tuotteen kuljetin rajoittaa tuottavuutta yleensä ainoastaan häiriötapauksissa, esimerkiksi haketorven tukkeutuessa. Jos lopputuote on tilavuuspainoltaan hyvin kevyttä, esimerkiksi ruokohelpi- tai olkisilppua, puulle mitoitetut kuljettimet voivat käydä ahtaiksi. Näin on tapahtunut muun muassa koemurskattaessa ruokohelpiä hidaskäyntisellä, kiinteällä voimalaitosmurskaimella. Tukokset kuljettimilla voivat olla seuraukseltaan erityisen

haitallisia, koska laitteet saattavat rikkoutua ja myös palovaara hihnakuljettimilla, rullilla ym. paikoissa on ilmeinen.

Oikein mitoitetussa hakkurissa tai murskaimessa mainitut rajoitteet ovat siten tasapainossa, että kukin rajoite tulee vastaa suurin piirtein samalla tuottavuudella. Käytännössä tämä ei ole aina mahdollista, koska raaka-aineen ominaisuudet vaihtelevat. Näin ollen optimoitaessa laiteratkaisuja tulisi tietää, mitä raaka-aineet ovat.

7.1.2 Tuottavuuksia käytännössä

Hakkilan (1984, 61) mukaan karsimattoman kokopuun haketus on noin 20% hitaampaa kuin karsitun rangan. Eroja kuitenkin on laitekohtaisesti, riippuen siitä, mikä aiemmin mainituista kokonaisuuden osista ensimmäisenä rajoittaa tuottavuutta. Syötön tehokkuuteen nähden suuri moottoriteho korostaa eroa ja päinvastoin.

Myös vuodenaika ja puulaji vaikuttavat haketuksen tuottavuuteen. Pieniläpimittaisen kokopuun haketuksen suhteellisia ajanmenekkejä (huomaa, ajanmenekki on tuottavuuden käänteisluku) eri raaka-aineilla on esitetty taulukossa 2 (Kuitto 1986, 9).

Taulukko 2. Pienpuun haketuksen suhteellisia ajanmenekkejä (Kuitto 1986, 9).

	Talvi	Syksy
Mänty, tuore	100	104
Mänty, ylivuotinen	125	95
Kuusi, tuore	116	100
Kuusi, ylivuotinen	154	
Koivu, tuore	149	103
Koivu, ylivuotinen	128	102

Bruks 1004 CT-rumpuhakkurin käyttöaikatuottavuus oli karsimattomilla männyillä ja lehtipuilla keskimäärin noin 80 MWh/h. Irtokuutiometreinä mäntyhaketta tuli noin 30% enemmän, mutta koivuvaltaisen lehtipuuhakkeen tiheys oli niin paljon suurempi, että energiayksikköinä mitattu tuottavuus oli hyvin samansuuruinen. Karsitun lahopuun haketuksen tuottavuus oli noin 10 % suurempi. (Nordén ja Andersson 1997).

Morbark 60/36 (30/36)-rumpuhakkurin tuottavuus havukokopuulla oli puolestaan noin 120 MWh/h (Hartsough ym. 1997, 59-68). Morbark 30 (23)-laikkahakkurin tuottavuus puoles-

taan oli likimain samansuuruinen (McDonald & Stokes 1994). Autoalustaiseksi melko pienikokoisen Future-hakkurin tuottavuus on ollut parhaimmillaan noin 65 MWh/h (Ikäheimo & Asikainen 1998, 16).

Karttunen ym. (2008, 36) mittasivat LHM Giant-hakkurin tehoaikatuottavuudeksi kokopuulla noin 160 MWh tunnissa. Saman hakkurin tuottavuus oksa- ja latvusmassan haketuksessa on suuruusluokassa 100 MWh tunnissa. Pienemmän Jenz 581 DL-hakkurin tehoaikatuottavuus puolestaan on kokopuulla ollut 134 MWh/h ja rangalla 157 MWh/h (Föhr 2010). Jenzin kokoonsa nähden hyvässä tuloksessa on huomioitava se, että hakkuri on asennettu kääntyvälle alustalle, mikä helpottaa syöttöä.

Pietarsaaressa sijaitseva suuri, syöttölaitteen rakenteeltaan erittäin järeän hakkurin tyyppinen, nopeakäyntinen Saalasti 1221-murskain voi hetkellisesti saavuttaa noin 400 MWh/h tuottavuuden. Kahdessa vuorossa työskenneltäessä on enimmillään ajettu oksa- ja latvusmassapaaleja keskimäärin noin 250 MWh/h (Saalasti 2008).

Kiinteiden, suomalaisten hidaskäyntisten murskaimien tuottavuus on oksa- ja latvusmassalla, kannoilla ja sopivan lyhyellä (alle 4 metriä) pienpuulla 80-100 MWh/h. Paalatulla tai muuten tiiviimmällä tavaralla tuottavuus voi olla suurempikin, saavutettu on noin 140 MWh/h. Mainitut tuottavuudet koskevat jatkuva, häiriötöntä ajoa silloin, kun murskain on kaksiroottorinen, hydraulisella voimansiirrolla, sähköteholtaan 400-500 kW ja leveydeltään noin neljä metriä. Käytännössä keskimääräinen tuottavuus on vähemmän, koska esimerkiksi kuormien välissä tulee ajanjaksoja, jolloin roottorit pyörivät hetken tyhjillään tai siten, että vain muutamia suuria kappaleita pyörii hyvin hitaasti murskautuen roottorien päällä. Maksimituottavuuden saavuttamiseksi roottorien päällä pitäisi olla koko ajan sopivasti tavaraa, mutta ei liikaa, holvautumisen välttämiseksi. Aina ei syötön ohjaus toimi siten, että optimaalinen metrin-kahden kerrospaksuus roottoreiden päällä toteutuisi koko ajan.

Tämän perusteella tuntuisi järkevältä siis käyttää mobiilihakkureita nimenomaan pienpuun haketukseen ja ohjata muodoltaan epämääräisempi ja hankalammin syötettävä oksa- ja latvusmassa vaikkapa kiinteille, hidaskäyntisille murskaimille mahdollisuuksien mukaan, jotka sopivat parhaiten nimenomaan hankalan muotoiselle, ei liian pitkälle tavaralle. Näin kunkin hakkuri- ja murskaintyypin ominaisuudet tulevat parhaiten hyödynnetyksi. Edelly-

tyksenä tietenkin on, että kyseiset toimintatavat sopivat tuotantoketjun muihin osiin siten, että kokonaisuus on järkevä.

Haketuksen kokonaistuottavuutta määriteltäessä on otettava huomioon itse haketuksen lisäksi myös oheistoimintoihin kuluva aika. Se voi olla merkittävä, kuten taulukon 3 esittämästä Ikäheimon ja Asikaisen (1998, 31) sekä Lahden ja Vesisenahon (1997) aineistosta havaitaan. Hakkurit ovat tässä keskisuuria, autoalustaisia laitteita.

Taulukko 3. Työajanmenekin jakauma ja energiayksikköä kohden lasketut ajanmenekit kahdella eri hakkurilla (Ikäheimo ja Asikainen 1998, 31 sekä Lahti ja Vesisenaho 1997).

	Future, %	Evolution, %	Future, min/MWh	Evolution, min/MWh
Käyttöaika	65	57	2,1	1,5
Huolto	3	2	0,1	0,05
Korjaus	4	4	0,13	0,10
Odotus	8	12	0,26	0,31
Siirto	7	18	0,23	0,46
Kouran/terän vaihto	8	6	0,26	0,15
Muu	5	2	0,16	0,05
Käyttötuntituottavuus keskimäärin, i-m^3/h	32,7	45,8		
Käyttötuntituottavuus kokopuulla, i-m^3/h	35,8	51		
Ajanmenekki kokopuulla yhteensä			3,2	2,6

Huomattakoon, että ainakin Futuren tapauksessa haketuksen tehoaikatuottavuus on ollut huomattavasti suurempi, noin 50 i-m^3/h. Käyttöajasta vain noin 60% on siis ollut käytettävissä itse haketukseen. Tämä osaltaan kuvastaa välivarastoilla metsätien varressa toimimiseen liittyviä käytännön hidasteita. Aikaa kuluu muun muassa hakkurin asettamiseen käyttökuntoon haketuspaikalle, hakkurin siirtämiseen kasan vierellä, kasan järjestelyyn, pohjan siivoukseen ym. Ajanmenekiksi muunnettuna käyttöaikaan kuuluva mutta tehoaikaan kuulumaton aika olisi Futurella tämän mukaan 0,84 min/MWh ja Evolutionilla 0,59 min/MWh.

Futuren työmaakoko tutkimuksessa oli vain 127 hakeirtokuutiometriä, Evolutionin 270. (Ikäheimo & Asikainen 1998, 16, 25). Pienpuuleimikot ovat kuitenkin keskimäärin suurempia, esimerkiksi Laitila ym. (2004, 15-16) esittävät leimikkokooksi noin 330 MWh eli

410 hakeirtokuutiometriä. Tämä vaikuttaa siirtoihin sekä työn aloittamiseen ja lopettamiseen käytettyyn aikaan.

Futuren ajankäytöstä on kulunut siirtoihin huomattavasti pienempi osa kuin Evolutionin, koska työkohteet ovat olleet lähempänä, keskimäärin 21 kilometrin etäisyydellä toisistaan. Odotusaika olisi todellisuudessa suurempi, mutta osa odotuksesta on käytetty huoltoon ja korjauksiin. Taulukon odotusajat tarkoittavat siis aikaa, jolloin ei ole ollut muuta tehtävää kuin vain odottaa hakeautoa saapuvaksi.

Muiden käytännön kokemusten ja myös simulointien mukaan kuumaan ketjuun perustuvassa tuotantotavassa, siis sellaisessa, jossa hakkuri tai murskain syöttää valmiin tuotteen suoraan odottavan auton kuormatilaan, hakkurin ja myös autojen odotus- tai jonotusaika on pienimmillään noin 20% kokonaistyöajasta. Tämä koskee siis sellaista ketjua, jossa tuottavuudet ovat tasapainossa kokonaisuuden kannalta parhaalla mahdollisella tavalla. Hakkurille voidaan sallia, kuten edellä todettiin, jonkin verran odotusaikaa, koska kyseinen aika on osin hyödynnettävissä. Autojen odotus sen sijaan menee lähes kokonaisuudessaan hukkaan, ellei jotakin pientä siivousta tms. ole tarpeen tehdä. Senkin tarve on yleensä lähinnä kuormatilojen täytön jälkeen.

Lahden ja Vesisenahon (1997) mukaan maahan haketettaessa tuottavuus on ollut 9% suurempi kuin suoraan odottavaan autoon haketettaessa. Tämä siksi, että maahan haketettaessa ei tarvitse odottaa vaihtoa autosta perävaunuun, tähtäillä hakeputkea kuormatiloihin tms. Kuormaus maasta auton omalla kuormaimella voisi olla varteenotettava vaihtoehto kuuman ketjun katkaisemiseksi, mutta ongelmana voivat olla maasta pohjimmaisten taakkojen mukana nousevat kivet ja maa-aines tai hakkeen liiallinen jääminen maastoon. Myöskään sellaisenaan sopivaa kalustoa ei Suomessa ainakaan vielä juurikaan ole. Tällainen kuljetus edellyttäisi autoa, jossa on sekä sivu- tai peräpurku että kuormain.

Haketuksen tuottavuus riippuu kaluston teknisen suorituskyvyn lisäksi puulajista ja -laadusta, kuljettajan taidosta, motivaatiosta ja vireystilasta, varastokasojen koosta ja laadusta, kivisyydestä, lumen määrästä, kasan jäisyydestä ja maaston pehmeydestä (Kuitto & Rajala 1982). Ikäheimon ja Asikaisen (1998) mukaan autoalustaisella Future-hakkurilla puun lumisuus ja jäisyys haittasivat haketusta 34 prosentilla työmaista. Haketuspaikan ahtaus puolestaan oli haittana 18 prosentilla työmaista ja upottavuus 11 prosentilla.

Kärhän ja Fredrikssonin (2008) haastattelemat hakeyrittäjät toivat esille merkittävimpänä ongelmana haketettavan puun mukana tulevat epäpuhtaudet, kuten kivet ja maa-aineksen. Toisaalta tämä koskee pääasiassa päätehakkuualojen oksa- ja latvusmassaa, pienpuussa ongelma on vähäisempi. Myös pienpuuta koskeviksi haketuksen ongelmiksi kyselyssä mainittiin ahtaat haketus- ja kääntöpaikat, huono tiestön kantavuus ja pienet varastokoot.

7.1.3 Laskentaperusteina käytetyt tuottavuudet

Haketus- tai murskausvaiheen kustannuslaskennassa on oletettu, että töitä tehdään 11 kuukautta vuodessa (yksi kuukausi suurempiin huoltoihin ja korjauksiin), kahdessa vuorossa, kuusi päivää viikossa ja siten, että jatkuvasti tehtynä työ vastaisi 6000 tunnin vuotuista työaikaa. Viimeksimainittu ottaa huomioon sen, että käyttäjälaitoksilla on kesällä kulutus pienempi kuin talvella eli haketta tai mursketta ei tehdä varastoon, vaan sitä mukaa kuin käyttöä on ja lähes tasaisena osuutena kaikista polttoaineista ympäri vuoden, kesällä hieman suurempana osuutena kuin muulloin. Näin laskien vuotuisia työtunteja tulee 3400.

Eri työvaiheiden ajanmenekit ja vuosituottavuudet ovat näillä lähtötiedoilla eri toimintatavoilla taulukon 4 mukaiset. Haketuksen tehotyön ajanmenekki kuvaa kyseiseen käyttötarkoitukseen, suuren mittakaavan tuotantoon soveltuvien laitteiden suorituskykyä. Tällaisia laitteita voivat olla muiden muassa keskikokoisena Jenz 581- ja suurena LHM Giant-hakkurit sekä hidaskäyntiset BMH- ja Raumaster-murskaimet, joita on suomalaisilla voimalaitoksilla. Vuosituottavuuden laskennassa on oletettu vuodessa tehtävän 3400 työtuntia. Lähteinä on sovellettu taulukon 4 ja Rinteen (2005) esittämiä tietoja sekä tässä työssä esitettyjä tietoja terä- ja muusta huollosta.

Taulukko 4. Haketuksen ja murskauksen työvaiheiden ajanmenekkejä ja tuottavuuksia kokopuulla. Yksikkönä on minuuttia/MWh paitsi alimmalla rivillä GWh/vuosi.

	Hakkuri tienvarsi-varastolla	Murskain terminaalissa	Kiinteä murskain, syöttö suoraan autosta
Huolto ja korjaus	0,15	0,15	0,05
Terien vaihto	0,15	0,05	0,05
Käyttökuntoon asettaminen, siivous ym.	0,4	0,1	0,05
Hakeauton odotus	0,3	-	0,3
Haketuksen tehotyö	0,4…0,6	0,3…0,6	0,2…1
Siirrot paikkojen välillä	0,3	0,05	-
Ajanmenekki yhteensä	1,7…1,9	0,65…0,95	0,65…1,45
Vuosituottavuus, GWh	120…110	310…210	310…140
Vuotuiset käyttötunnit hakkurille tai murskaimelle	1200…1400	1800…2300	1100…2400

Tässä esitetyt arvot ovat vain esimerkkejä ja käytännössä eri laitteilla ja käyttäjillä tuottavuudet saattavat olla hyvinkin erilaisia. Esimerkkien taustalla on ajatus, että laitteet ovat uudehkoja ja toiminta on ammattitaitoista ja harjaantunutta.

Terähuoltoon kuluva aika on murskilla hakkuria pienempi pidemmän teränvaihtovälin ansiosta. Terähuollon suuruus riippuu luonnollisesti raaka-aineen puhtaudesta. Tässä on koetettu hakea keskiarvoa nykytilanteesta Suomessa.

Vuotuiset käyttötunnit taulukon alimmalla rivillä tarkoittavat hakkuri- tai murskainosan käyttöä, joten odotuksia, huoltoja ja siirtoja ei lasketa tähän. Lisäksi on oletettu, että hakkuri on käynnissä puolet käyttökuntoon asettamiseen ym. kuluvasta ajasta ja kyseinen puolet on käyttötunneissa mukana.

Vuotuiset käyttömäärät, siis erityisesti kokonaistyöaikaa tarkoittaen, ovat oletuksena suurehkoja ja käytännössä jäädään usein taulukossa mainitun alle. Tähän on syynä muun muassa se, että koneet ovat usein yhden miehen käyttämiä, koska tällöin koneen ominaispiirteet ja huollon tilanne ovat parhaiten kuljettajan tiedossa. Koska siirrettävien laitteiden tapauksissa käyttöikä kuitenkin pitenee, jos vuotuinen käyttöaika lyhenee, ei vaikutus kustannuksiin ole kovin suuri. Periaatteessa vain korkokulut ja vakuutuksen yksikkökulut kasvavat vuotuisen käyttöajan lyhentyessä, ellei palkattua työvoimaa ole pidettävä seisokkien-

kin aikana. Pääoman korkea tuottovaatimus voi kuitenkin muuttaa tilannetta, kuten luvussa 8 todetaan.

Kiinteällä murskalla tuottavuus voisi periaatteessa olla tämän mukaan noin 600 GWh vuodessa, jos autot syöttäisivät suoraan murskainta silloin kun se onnistuu odottamatta, mutta purkaisivat muuten erilliseen kasaan murskaimen viereen, josta murskainta syötetään erikseen. Näin on toimittu esimerkiksi Alholmens Kraftilla Pietarsaaressa. Tässä on kuitenkin perusvaihtoehtona ajateltu, että käyttömääriä ei saada ainakaan 300 GWh:a suuremmiksi, jolloin syöttö suoraan autosta on mahdollinen ja kannattavakin vaihtoehto. Autot eivät voi käytännössä tulla aivan peräkkäin, koska tällöin muodostuisi jonoa, vaan on oletettu, että kuormien välille tulee 20 minuutin taukoja, joista muodostuu taulukossa oleva odotuksen ajanmenekki. Tässä tapauksessa murska siis ”odottaa” irtotavaraa tuovia autoja. Hidaskäyntisen murskan puskurivarastona toimivana palkkisyöttimellä voidaan tosin syöttöä tasata ja näin saada enemmänkin menemään tavaraa vuodessa läpi.

Kiinteälle murskalle tuotavan tavaran määrää rajoittaa se, että hankinta-alueen on oltava kohtuullisen kokoinen. Hakettamattoman tavaran kuljetus on kallista, eikä sitä kannata kuljettaa kovin pitkiä matkoja. Kuljetuskustannus MWh:a ja kilometriä kohden saattaa olla esimerkiksi kaksinkertainen verrattuna kuivan, haketetun tavaran kuljetukseen terminaalista voimalaitokselle. Toisaalta jos murskain on voimalaitoksella, ketju yksinkertaistuu siinä määrin, että melko pitkäkin hakettamattoman tavaran kuljetus voi olla kustannuksiltaan vielä hyväksyttävissä.

VTT:n arvion mukaan esimerkiksi vanhan Hämeen läänin alueelta on korjattavissa 430 000 m^3 oksa- ja latvusmassaa vuosittain. Tämä merkitsee 24,1 m^3/km^2 maapinta-alaa/a eli noin 0,7 MWh/ha metsämaata/a. Kokemusperäisesti on puolestaan saatu kertymäksi 0,56 MWh/ha/a. Pienpuun keskimääräiseksi saannoksi saanto on puolestaan saatu 0,35 MWh/ha metsämaata/a. (Rinne 2005, 5 ja 6). Nämä eivät kuitenkaan välttämättä ole ”täysiä potentiaaleja”, vaan 2000-luvun alussa toteutuneita.

Jos oletetaan koko metsäenergiapotentiaalin, noin 30 TWh, olevan tasaisesti kerättävissä koko Suomen alueelta Lappia lukuun ottamatta, on saanto noin 150 $MWh/km^2/a$. Tällöin 30 kilometrin keskikuljetusmatkalta olisi saatavissa 420 GWh energiaa hankintaympyrän keskipisteessä sijaitsevan terminaaliin, jos tiestön keskimääräinen mutkittelukerroin (matka

tietä pitkin suhteessa suoraan etäisyyteen) olisi 1,4 ja kaikki alueen energiapuu saataisiin kyseiseen terminaaliin. Käytännössä puu kulkee myös muita reittejä ja alakohtaisessa saannossa on eroja, joten laskelma on vain hyvin likimääräisesti suuntaa-antava.

7.2 Laitteiden käyttöikä ja kuluminen

Koneen käyttöiäksi katsotaan se aika, jona se toimii riittävän luotettavasti, toisin sanoen todennäköisyys satunnaiselle rikkoontumiselle on riittävän pieni. Toisaalta vaihto voi tuntua tarpeelliselta myös teknisen vanhentumisen vuoksi, toisin sanoen uudet, markkinoille tulleet laitteet saattavat olla jossakin mielessä sen verran parempia kuin vanha, että sinänsä toimiva laite vaihdetaan uuteen. Hakkurit ovat kuitenkin melko hitaasti uudistuvaa tekniikkaa eikä muotikaan vaikuta kovin paljon valintoihin, joten vaihdon syyt ovat kuitenkin lähinnä kulumisesta johtuvia. On silti mahdollista, että esimerkiksi toiminnan laajentuessa pieneksi jäänyt kone vaihdetaan suurempaan ja myydään vanha vaikkapa aloittelevalle urakoitsijalle.

Rikkoontumistodennäköisyys kasvaa koneen ikääntyessä ja tietyn rajan jälkeen kannattaa hankkia uusi kone mieluummin kuin jatkaa vanhan, vaikka periaatteessa toimivan käyttöä (Laine 1998). Rikkoontumisten syyt voidaan jakaa seuraavasti (Bohm&Bengtsson 1993):

1. Koneen ikääntyminen ja normaali kuluminen
2. Käyttövirhe
3. Puutteellinen huolto ja kunnossapito
4. Materiaali- tai konstruktiovirhe
5. Väärin tai huonosti tehdyt korjaukset
6. Onnettomuudet

Näistä suurten laitteiden kohdalla kyseeseen tulee lähinnä kohta 1. Rikkoontumisia voidaan osittain välttää huolellisella kunnossapidolla. Koneen vanhetessa kuluminen kuitenkin alkaa heikentää sen luotettavuutta tai vaihtoehtoisesti joudutaan uusimaan yhä suurempia ja kalliimpia osia. Laineen (1998) mukaan traktorin vuotuiset kunnossapitokustannukset kasvavat vuoden 2010 rahassa ilmaisten ensimmäisten tuntien noin 1 eurosta 5 euroon käyttötunnilta, kun käyttötunteja tulee 10 000. Kasvu on lineaarinen.

Jos oletetaan, että huoltokustannukset ovat suoraan verrannollisia koneen hankintahintaan, hakkurin kunnossapitokustannukset 10 000 käyttötunnin ikäisenä olisivat edellä esitettyä soveltaen 90 senttiä/MWh. Tämä olisi jo varsin paljon, mutta toisaalta kyseisen ikäinen hakkuri alkaisikin olla jo käyttöikänsä lopussa. Lineaarisen nousun mukaan laskien hakkurin ja alusta-auton huoltokustannukset olisivat tämän mukaan keskimäärin noin 45 senttiä/MWh laitteen käyttöiän aikana. Ellei teräkustannuksia lasketa mukaan, käytännön havaintojen mukaan keskimääräiset kunnossapitokustannukset ovat jonkin verran pienempiä, esim. 30 senttiä/MWh. Teräkustannuksen pitäminen erillään voidaan perustella sillä, että se on hakkurin erityiseen käyttötarkoitukseen liittyvä kulutusosakustannus, jota ei ole tavallisissa traktoreissa, metsäkoneissa tms. työkoneissa.

Maataloustraktoreiden kestoikänä pidetään noin 12 000 tuntia (ASAE Standardi 1994). Traktoreissa on periaatteessa samantyyppisiä osia kuin hakkurissa ja se on monimutkaisuudeltaan likimain samaa luokkaa. Molemmissa on esimerkiksi dieselmoottori, hydrauliikkaa ja mekaanisia voimansiirtokomponentteja. Tosin hakkureiden moottoreiden kuormitusasteen, tärinän ym. voidaan olettaa olevan suurempia kuin maataloustraktorissa, joten tekninen käyttöikä voi jäädä hiukan lyhyemmäksi. Myös metsäkoneita voidaan käyttää vertailuna, sillä niissäkin on varsin samankaltaista tekniikkaa kuin hakkureissa.

Toisaalta tarkkuussilppurin tekniseksi käyttöiäksi mainitaan samassa lähteessä vain 2500 tuntia. Tarkkuussilppuri on korsibiomassojen, kuten esimerkiksi oljen ja ruokohelven, korjuuseen tarkoitettu laite. Siinä on noukin, joka kerää silputtavan tavaran pellolta, syöttöruuvi, syöttörullat ja, mikä tässä yhteydessä on mielenkiintoista, pieni laikka- tai rumpuhakkuri. Laitteet ovat kevytrakenteisia, mikä selittänee lyhyen kestoiän.

Sama koskee vielä korostetummin korsibiomassojen paalisilppureita, joiden kevytrakenteisten mallien suunniteltu kestoikä voi olla esimerkiksi vain 7000 pyöröpaalia, siis noin 7 GWh. Tätä voi verrata puuhakkureiden kestoiän suuruusluokkaan, 500 GWh:iin. Laitteiden hintakin on tosin halpa. Mielenkiintoista on, että kevytrakenteisen paalisilppurinkin tapauksessa pääomakustannukseksi tulee noin 1 euro/MWh, saman verran siis kuin huomattavasti järeämmillä puuhakkureilla. Tarkkuussilppurilla pääomakulut ovat hieman vähemmän, suuruusluokkaa 50 snt/MWh, jos tuotteet ajateltaisiin käytettäväksi energiaksi. Maatalouskoneiden kohdalla on tosin huomioitava se, että niiden vuotuiset käyttömäärät ovat

vain murto-osa raskaampien hakkureiden vastaavista, joten korkokulut ovat suuret. Korot eivät sisälly mainittuihin kuluihin maatalouskoneiden osalta.

Esimerkiksi suurissakin hakkureissa rumpu on yleensä ontto, mikä saattaa aiheuttaa ongelmia pitkäaikaisessa käytössä. Kulunut rumpu saattaa olla epätasapainossa ja lopulta myös kestävyys on kyseenalainen. Ohueksi kulumiseen ei auta muu kuin vaihtaa koko rumpu.

Myös murskaimen taloudellinen käyttöikä riippuu mm. murskaimen rakenteesta, kuormituksesta, murskattavan tavaran puhtaudesta ja kunnossapidon tasosta. Järeän murskaimen ja sen oheislaitteiden käyttöikä voi olla kymmeniä vuosia. Esimerkiksi eräs valmistaja ilmoittaa kiinteän murskaimensa komponenttien olevan laskennallisesti mitoitettu 100 000 tunnin käyttöä varten. Jos tehollinen käyttöaika on esimerkiksi 1500 tuntia vuodessa, on murskaimen laskennallinen käyttöikä peräti 67 vuotta. Todennäköisesti muut osat kuitenkin kuluvat loppuun jo paljon aiemmin tai laitos on käyttöikänsä päässä muusta syystä.

Hakkureiden elinikää voidaan jatkaa peruskunnostamalla ne. Laineen (1994, 39) mukaan huoltomiehet ovat arvioineet, että traktoreiden tapauksessa peruskorjaus on tarpeen 6500-7000 käyttötunnin jälkeen. Tällöin mm. moottori kunnostetaan tavallista perusteellisemmin. Hakkureiden käyttöikää voidaan jatkaa myös siirtämällä ne toisarvoiseen käyttöön, jossa luotettavuus ei enää ole niin tärkeätä kuin jatkuvassa työssä. Joitakin suomalaisia hakkureita on myyty mm. Itä-Euroopan maihin, joissa työvoimakustannukset suhteessa konekustannuksiin ovat Suomea edullisemmat. Viimeksi mainitussa tilanteessa on luonnollisesti kannattavampaa käyttää suhteellisesti suurempi osa resursseista työvoimaan huollon ja kunnossapidon muodossa.

Tässä tehdyssä kustannuslaskennassa on oletettu, että mobiililaitteiden käyttöikä on 8000 tuntia, jonka jälkeen niiden jäännösarvo on 0. Käytännössä laitteita voidaan käyttää pidempäänkin mittavilla kunnostuksilla, mutta yksinkertaisuuden vuoksi tässä on oletettu laite käytettävän kerralla loppuun. Jäännösarvoa voi koneella olla vielä jäljellä mainitun ikäisenäkin, mutta varsinkin diskontattaessa se nykyhetkeen, vaikutus on pieni. Kiinteitä murskaimia on oletettu käytettävän 15 vuotta käyttömäärästä riippumatta, järeän rakenteen vuoksi. Teknis-taloudellinen kestoikä sinänsä voi niillä olla paljon pidempikin, rajan asettaa muun muassa tulevaisuuden epävarmuus.

7.3 Rahoitus

Suomessa käytetään suurten energiapuumäärien mobiilihaketuksessa lähinnä autoalustaisia hakkureita. Niiden hankintahinnat ovat alustoineen, kuormaimineen ja päällirakenteiden asennuksineen 400 000 - 700 000 euroa. Tämä muodostuu tyypillisesti seuraavista osista:

- alusta-ajoneuvo 110 - 130 000 euroa
- kuormain ja ohjaamo 70 - 100 000 euroa
- asennukset 20 - 50 000 euroa
- hakkuri syöttölaitteineen ja moottoreineen 150 - 300 000 euroa
- asennukset 20 - 50 000 euroa

Hakkuri- ja murskaininvestoinneille myönnetään työ- ja elinkeinoministeriön tukea, joka on tarkoitettu mm. uusiutuvien energian tuotantolaitteille. Tuen suuruus on 20-25% investoinnista. Ajoneuvoja ei tueta eli tässä tapauksessa alusta-ajoneuvo jää tuen ulkopuolelle. Tässä työssä tukea ei ole peruslaskelmassa huomioitu, mutta tunnetuista lähtötiedoista sen vaikutus on helppo laskea.

Investointiin tarvittavan rahan hinta tai toisin sanottuna pääoman tuottovaatimus riippuu siitä, kuinka riskialttiiksi sijoittaja investoinnin näkee. Teknisen riskin eli suunniteltujen suoritusarvojen toteutumattomuuden lisäksi tulisi kyetä ottamaan huomioon seuraavat, normaalit yritysrahoituksen riskit (Kasanen ym. 1996, s. 27 ja 29):

- vahinkoriskit
- taloudelliset riskit, sisältäen rahoitusriskit ja perusliiketoiminnan riskit
- korkoriski
- hyödykehintariski, mm. toimintoihin tarvittava energia

Puun haketus- tai murskaustoiminnassa voivat erityisesti seuraavat riskit vaikeuttaa toimintaa, soveltaen Hallikkaan ym. (2003) esittämää listausta:

- vaikeudet uusien menetelmien ja laitteiden käyttöönotossa
- erikoislaitteiden käytön jääminen oletettua vähäisemmäksi
- tuotanto-ongelmat, esimerkiksi laiterikot

- keskenään yhteensopimattomat toiminnaohjausjärjestelmät tuotantoketjun eri toimijoilla
- ei tuotannonohjausjärjestelmiä pienyrityksillä
- yritysten menestys harvoista avainhenkilöistä kiinni
- ongelmia ammattitaitoisen työvoiman saannissa
- huono raaka-aineen laatu (kosteus, epäpuhtaudet)
- käyttäjä ei luota tuotantoketjuun
- vaihteleva kysyntä, pienemmän käytön aikana ketjun toimijoiden verkostot voivat hajota tai yritykset kaatua
- suuret investoinnit
- epäselvyys kannattavista investoinneista myös tulevaisuuden kehitys huomioiden
- rahaa on sitoutuneena varastoihin
- liian pienet katteet, ei voimavaroja toiminnan kehittämiseen
- työn vaikutukset työntekijöiden terveyteen pitkällä aikavälillä ovat epäselviä
- ulkomaisen, erityisesti Venäjältä tulevan puun aiheuttama hintakilpailu

Toisaalta haketuksen ja murskauksen kysyntä on voimakkaassa kasvussa ja puun syöttötariffi päästöoikeuden hintatakuun muodossa pitää polttoaineiden hintasuhteita puulle melko edullisena. Nämä pienentävät sijoituksen riskiä, päästöoikeuden hinnan alarajatakuu huomattavastikin. Voimakas kysynnän kasvu voi olla ongelmakin, sillä alalle tulo ei aina onnistu helposti. Tältä kannalta jo olemassa olevat yritykset ovat hyvässä asemassa kokemuksensa myötä.

Metsäteollisuudessa on vaadittu investoinneista päätettäessä suurille, uusille tehdasinvestoinneille vähintään 13% sisäistä korkoa. Modernisoinneissa vaadittu sisäinen korko on suurempi, suurissa hankkeissa 18%, pienissä 25%. Korkovaatimuksen suuruus näissä johtuu siitä, että laitteistoihin jää yhä vanhoja osia, jotka lisäävät teknistä riskiä. (Diesen 1998, 130). Tämä on numeerinen ilmaisu sille, miksi usein kannattaa vaihtaa vanha, vielä toimiva kone uuteen, mitä asiaa käsiteltiin kaluston käyttöiän yhteydessä.

Koneyritysten tuotto on yleensä muutaman prosentin luokkaa. Kaikkien alojen yrityksiä tarkastellen 5-10% tuottoa pidetään kohtuullisena. Eräs energiayhtiö puolestaan edellyttää laitoksille tehtäviltä investoinneilta 15% sisäistä korkoa. Yleistäminen on hankalaa, sillä tuottoa pitäisi aina tarkastella suhteessa riskiin eli investoinnin sisäisen koron tulisi olla

suurempi kuin peruskorko lisättynä riskipreemiolla. Juuri riskipreemion määrittäminen objektiivisesti on hankalaa, koska ennakoitavia asioita on paljon. Pienillä koneyrityksillä riskipreemiot ovat voineet olla pieniä, koska tiukan paikan tullen omistaja-kuljettaja on tinkinyt omasta palkastaan tai venyttänyt työpäiväänsä. Tämä ei kuitenkaan enää onnistu, kun työntekijöinä on muitakin. Toisaalta bioenergiatavoitteiden vaatima kasvu edellyttää todennäköisesti ulkopuolisia sijoittajia rahoittajiksi. Siksi voidaan olettaa, että yritykseltä odotetaan samanlaista pääoman tuottoa kuin muiltakin vastaavan riskitason sijoituksilta, siis esimerkiksi 10%, jota on käytetty luvun 8 laskelmissa.

Osa riskeistä voidaan hajauttaa vakuutuksin. Palovakuutuksen vuosimaksu on noin 1/1000 murskaimen hankintahinnasta ja rikkoutumisvakuutuksen vuosimaksu esimerkiksi 100 000 markan omavastuulla noin 3/1000 investoinnista eli esimerkiksi 700 000 euron murskaimen vakuutusmaksu olisi yhteensä 2800 euroa vuodessa (Tukia 2000). Liikkuvassa kalustossa on vielä otettava liikennevakuutukset tämän lisäksi.

7.4 Työvoima

Hakkurin tai murskaimen käyttäjän palkka on sivukuluineen 20-25 euroa/tunti. Peruspalkka ilman sivukuluja voi olla esimerkiksi 15 euroa/tunti. Työvoimakustannusten laskennassa on huomioitava, että varsinkin välivarastohaketuksen tapauksessa huomattava osa ajasta kuluu muuhun kuin itse haketukseen ja tämä muukin aika on palkallista.

Työn hallinnointiin, paikkojen katsomiseen, huoltojen ym. suunnitteluun kuluu lisäksi aikaa. "Toimistotyön" osuus riippuu suuresti tapauksesta, mutta voi olla esimerkiksi 2 - 4 tuntia/varastopaikka.

7.5 Terä- ja muu huolto

Hakkureiden ja murskaimien terät on pidettävä riittävän terävinä tai aggressiivisina seuraavista syistä:

- Tylsät terät lisäävät varsinkin pienten laitosten syöttölaitteille haitallisten tikkujen, ohuiden oksien ja kapuloiden määrää lopputuotteessa. Yhdessä tutkimuksessa yli 200 mm:n tikkujen osuus rumpuhakkurin tekemässä hakkeessa kasvoi 0,02:sta 0,4:ään painoprosenttiin terien tylsyessä (Seppänen 1988, 35).
- Hienontamisen energiankulutus suurenee ja kapasiteetti pienenee sen vuoksi. Tällä on merkitystä erityisesti silloin, kun moottoritehon riittävyys on määräävä tekijä tuottavuudessa, kuten esimerkiksi karsittua rankaa haketettaessa.
- Hidaskäyntisissä murskaimissa terät eivät saa otetta murskattavasta tavarasta, jolloin kapasiteetti voi huonontua paljonkin
- Hienoaineksen määrä lisääntyy terien tylsyessä. Se voi olla joissakin kattiloissa haitallista polton kannalta erityisen kuivalla tai märällä puulla.

Selluhakkeen teossa terät vaihdetaan noin 1500-2000 m^3:n välein. Keskimääräisen, kiinteän laikkahakkurin ominaisuuksien perusteella (10 terää, terien pituus noin 1,1 m) tämä merkitsee sitä, että terän pituusmetriä kohden haketetaan noin 150 m^3 eli vajaa 400 hakeirtokuutiometriä. (Niiranen 1983, 194 ja 209).

Seppäsen ym. (2002) tutkimuksessa selvitettiin rumpuhakkurin terien kulumista Chipset-palstahakkurin ja Giant-välivarastohakkurin tapauksissa. Haketettava materiaali oli enimmäkseen oksa- ja latvusmassaa. Tuloksena saatiin kaavan 1 mukainen yhtälö.

$$K = 0{,}11 + 0{,}005 * V + 0{,}67 * k, \quad (1)$$

jossa

K = terän kuluminen kärjestä mitattuna, mm

V = haketettu määrä, hakeirtokuutiometriä terän pituusmetriä kohden

k = kivisyys. 0 = ei kiviä, 1 = vähän kiviä, 2 = normaali, 3 = kivistä, 4 = hyvin kivistä tai muita isoja epäpuhtauksia.

Teriä teroitettiin 6 mm kerrallaan. Jos tämä sijoitetaan suoraan kaavaan K:ksi ja oletetaan kivisyyden olevan normaali, terän pituusmetriä kohden olisi haketettu yli 900 hakeirtokuutiometriä. Näin ei kuitenkaan liene, vaan terien ”tasainen” kuluminen on ollut vähäisempää ja teroituksen syvyys on määräytynyt kivien tekemien yksittäisten kolojen perusteella.

Energiapuuhakkurin terät voivat talvella pysyä kelvollisessa haketuskunnossa noin 400 hakeirto-m^3:n haketuksen ajan. Lumi ehkäisee tällöin kivien ja maa-aineksen joutumista kourataakkoihin mukaan. Terän pituusmetriä kohden tämä on 100 - 200 hakeirto-m^3. Ero selluhakkuriin johtuu siitä, että hyvissäkin olosuhteissa energiapuussa on paljon enemmän epäpuhtauksia kuin kuoritussa ainespuussa. Kesällä terien vaihto- tai teroitusväli voi olla energiapuun teossa vain esimerkiksi 100 hakeirto-m^3 eli 25 - 50 hakeirto-m^3 terän pituusmetriä kohden. (Nousiainen ym. 1995, 37).

Terät ovat usein pulteilla kiinnitetyt roottoriin. Ne vaihdetaan käsin joko hakeautoa odotettaessa tai muuna aikana. Terien vaihto on pyritty tekemään helpoksi siten, ettei sitä varten tarvitse tehdä erityisiä valmisteluja, vaan riittää, että kone pysäytetään, kansi avataan ja pulttikiinnitteiset terät vaihdetaan paineilmatoimista mutterinväännintä apuna käyttäen. Esimerkiksi LHM Giant-hakkurissa on neljä 720 mm pitkää terää. Niiden vaihto kestää kenttäolosuhteissa yhteensä 15-20 minuuttia (kuva 15). (Rinne 2008).

Kuva 15. *Hakkurin terien vaihtoa haketuspaikalla. Kuva SR.*

Hakkureiden terähuollon välittömät kustannukset oksa- ja latvusmassalla ovat VTT:n tekemän kyselyn mukaan noin 20 snt/MWh. Välilliset tulonmenetykset ovat puolestaan 25 snt/MWh (Seppänen ym. 2002). Ruotsissa puolestaan palstahakkureiden teräkustannukset ovat keskimäärin noin 40 snt/MWh (Bruks 1998).

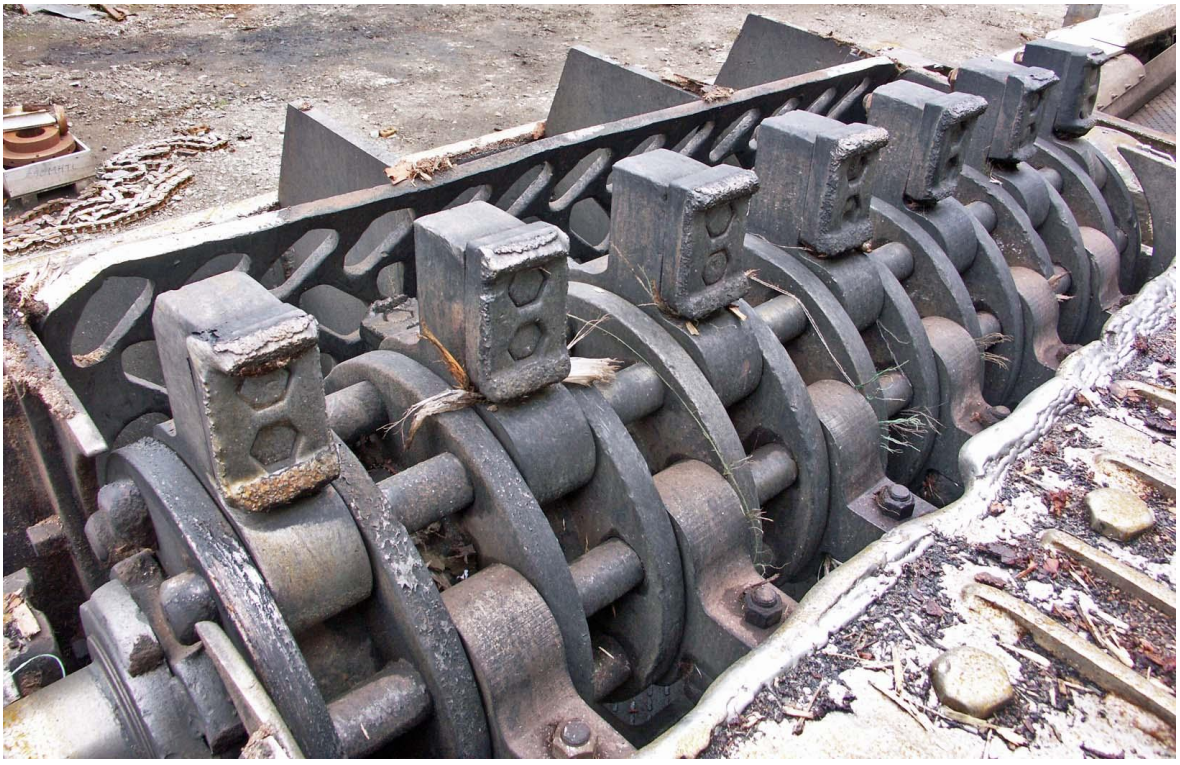
Asikaisen (2000) mukaan hakkurin teräkustannukset puhtaalla, tuoreella oksa- ja latvusmassalla ovat nykyrahaksi muutettuna 25 - 50 snt/MWh. Pienpuulla teräkustannukset lienevät samaa luokkaa tai jonkin verran vähemmän, koska materiaali on melko puhdasta. Tavanomaiset teräkustannukset oksa- ja latvusmassalla ovat 50 - 80 snt/MWh, mutta epäpuhtaalla syötteellä ne voivat olla 1,3 euroa/MWh. Kuivalla syötteellä kustannukset ovat 10-20% suuremmat.

Teräkustannukset muodostuvat puoliksi hankintahinnasta, puoliksi teroituksesta. Teriä voidaan teroittaa noin 20 kertaa. (Hakkila 1984, 61). Teräkustannukset ovat kyseisen julkaisun mukaan olleet lähinnä kokopuun haketuksessa 215 p/m^3 ja karsitun rangan haketuksessa 180 p/m^3. Nykyrahassa energiayksikköä kohden ilmaistuna nämä ovat vastaavasti 34 snt/MWh ja 28 snt/MWh. Teroitusväli on ollut kokopuulla 33 MWh eli 40 hakeirto-m^3 ja karsitulla rangalla 49 MWh eli 60 hakeirto-m^3, siis keskimäärin vain yksi perävaunuttoman auton kuorma. Tuolloin tutkitut hakkurit ovat kuitenkin olleet pienehköjä, jolloin terien kulutuspintaakin on vähemmän kuin uudemmissa, suuremmissa hakkureissa.

Murskaimien teräkustannukset ovat pienemmät ja huoltovälit huomattavasti pidempiä kuin hakkurissa, jos käsiteltävä tavara on samaa. Eräiden kokemusten mukaan terien pituusmetriä kohden voidaan ajaa noin 3000 murskeirtokuutiometriä eli monikymmenkertainen määrä hakkuriin verrattuna.

Toisaalta voidaan sanoa, että murskain vastaa tavallaan hakkuria, jossa on tylsät terät. Murskaimen ”huonous” tässä mielessä tulee esiin sitä enemmän, mitä paksumpaa ja kovempaa puuta haketetaan. Ohuilla oksilla, kuorella ja muulla jo valmiiksi melko pienellä syötteellä murskaimille on mitattu jopa pienempiä ominaisenergiankulutuksia kuin hakkureille. Tosin on muistettava, että lopputuotteen laatukaan ei ole sama. Murskeessa voi olla paljonkin enemmän pitkiä tikkuja. Murskaimessa kerralla tehtävän terähuollon määrä on myös suurempi, kulunutta ainetta on siis enemmän kuin hakkurissa siinä vaiheessa, kun murskaushampaat huolletaan.

Murskaushampaat päällystetään tai korjataan täytehitsaamalla (kuva 16). Terät voidaan ottaa irti hitsausta varten. Hitsaaminen paikallaankin on mahdollista, mutta hankalampaa ja palovaara on suuri. Hampaiden muodosta voidaan tehdä hakkuria muistuttava hiomalla hitsaus. Toinen vaihtoehto on jättää pinta karkeaksi, mahdollisesti piikarbidihiukkasilla seostetulla lisäaineella kulutuskestävyyden lisäämiseksi ja murskauksen repimisvaikutuksen tehostamiseksi.



Kuva 16. *Kaukalomurskaimen roottori täytehitsattuine terineen. Huomaa pyöristynyt vastaterän hitsaus etuoikealla ja melko pienisilmäinen seulaverkko. Kuva SR.*

Murskaimissa seulaverkolla on olennainen vaikutus hienontamisessa. Näin ollen sitäkin on huollettava, vaihtamalla se uuteen tai samaan tapaan täytehitsaamalla kuin murskaushampaita. Myös vastaterää on täytehitsattava aika ajoin ja lisäksi vaihdettava kulutuslevyjä murskauskammion sisältä ym. Kaiken kaikkiaan murskaimen itse murskainosan kulutusosakustannuksiksi oksa- ja latvusmassalla on arvioitu 7 - 30 senttiä/MWh.

Muita kuluvia osia hakkureissa ja murskaimissa ovat mahdollinen kuormain, syöttölaitteen osat ja hakepuhallin tai murskekuljetin sekä dieselmoottori. Näiden huollosta tulee kustan-

nuksia arviolta 10 - 20 senttiä/MWh. Karkeasti muita huoltokustannuksia voi myös arvioida tämänkokoisten laitteiden yleisillä huoltokustannuksilla, jotka ovat 10 - 15 euroa/tunti.

Hidaskäyntisissä murskaimissa käytetään noin 5 cm leveitä teräpaloja, jotka ensin käännetään ja sitten vaihdetaan. Yksittäisiä teriä on paljon, noin 150 - 300 kappaletta, joten vaihtotyöhön kuluu aikaa kauemmin kuin nopeakäyntisillä murskaimilla. Toisaalta huoltoväli-kin on pitkä, esimerkiksi 20 GWh.

Kampamaiset vastaterät ovat hidaskäyntisellä murskaimella ”seulan” asemassa, joten niitäkin on huollettava aika ajoin. Kaiken kaikkiaan hidaskäyntisen murskaimen terä- ja vastateräkustannuksiksi on arvioitu puhtaahkolla tavaralla 10-20 senttiä/MWh. Muut huoltokulut ovat pienemmät kuin nopeakäyntisissä mobiililaitteissa, koska rakenne on järeä ja käytetyt painetasot hydrauliikassa roottoreiden käyttöä lukuun ottamatta teollisuusstandardien mukaisia eli pienempiä kuin mobiilisovellutuksissa. Muun huollon hinnaksi hidaskäyntisillä murskaimilla on arvioitu 5 - 15 senttiä/MWh.

Hintatiedot, joille ei mainita lähdettä, ovat peräisin useilta voimalaitoksilta, murskausyrittäjiltä, -valmistajilta ja -myyjiltä.

7.6 Käyttämiseen tarvittava energia

Puuaineksen hienontamisen energiankulutukseen vaikuttaa voimakkaasti tuotteen palakoko. Energiankulutus alku- ja lopputuotteen palakokojen funktiona voidaan ilmaista Bondin kaavalla. Kaava on yleisessä muodossaan

$$E = E_i * (1 / X_t^{½} - 1 / x_s^{½}), \quad (2)$$

jossa

E = energiankulutus tuoteyksikköä kohden,

E_i = Bondin työindeksi (riippuu murskaintyypistä),

x_t = tuotteen palakoko ja

x_t = syötteen palakoko.

Tässä tapauksessa kaavan käytännön sovellusta helpottaa, jos siitä jätetään pois syötteen palakoko vaikean määriteltävyytensä vuoksi. Näin saadaan kaavan (3) kuvaama riippuvuus.

$$E_{kWh} = 25/x_t^{1,03}, \quad (3)$$

jossa

E_{kWh} = haketuksen tai murskauksen ominaisenergiankulutus (kWh mekaanista energiaa/tuotetun polttoaineen MWh) ja

x_t = tuotteen keskimääräinen palakoko. (Järvinen ja Rinne 2005, Hamelinck 2003, 36).

Keskimääräinen palakoko saadaan olettamalla, että kullekin seulalle jääneen kokoluokan palakoko on ko. luokkaa rajoittavien seulakokojen puolivälissä ja painottamalla tämä luokkien keskiarvo kyseisen luokan osuudella.

Kaavaa voi käyttää sekä hakkureille että murskaimille, jotka ovat nopeakäyntisiä, ensin vastaterää ja sitten seulaverkkoa varten hienontavia laitteita, rumpuhakkurin tyyppisiä. Kovin karkealle palakoolle (esim. yli 50 mm) kaava ei antane oikeaa tulosta, vaan aliarvioi energiankulutuksen. Murskattava materiaali on kokeissa ollut oksa- ja latvusmassaa, mutta sama kaava soveltunee hyvin myös pienpuulle. Teräväteräisen hakkurin etu tylppäteräiseen murskaimeen nähden tulee hienontamisen energiankulutusta tarkasteltaessa muun muassa siitä, että hakkuri tekee vähemmän hienoainesta kuin murskain ja näin keskimääräinen palakoko on suurempi, minkä vaikutus voidaan nähdä kaavasta.

Aiemmin mainitussa Seppäsen ym. tutkimuksessa (2002) tehtiin pienellä rumpuhakkurilla kokeita haketuksen energiankulutukseen vaikuttavien tekijöiden selvittämiseksi. Tässä tapauksessa leikuunopeudella ei ollut suurta vaikutusta energiankulutukseen. Kaavassa 4 on ilmaistu kulutus terän terävyyden ja teräkulman funktiona.

$$E = -1,79 + 0,69 * K + 0,0843 * \beta, \quad (4)$$

jossa

E = leikkuuenergia, kWh/m^3

K = terän kuluminen kärjestä mitattuna, mm

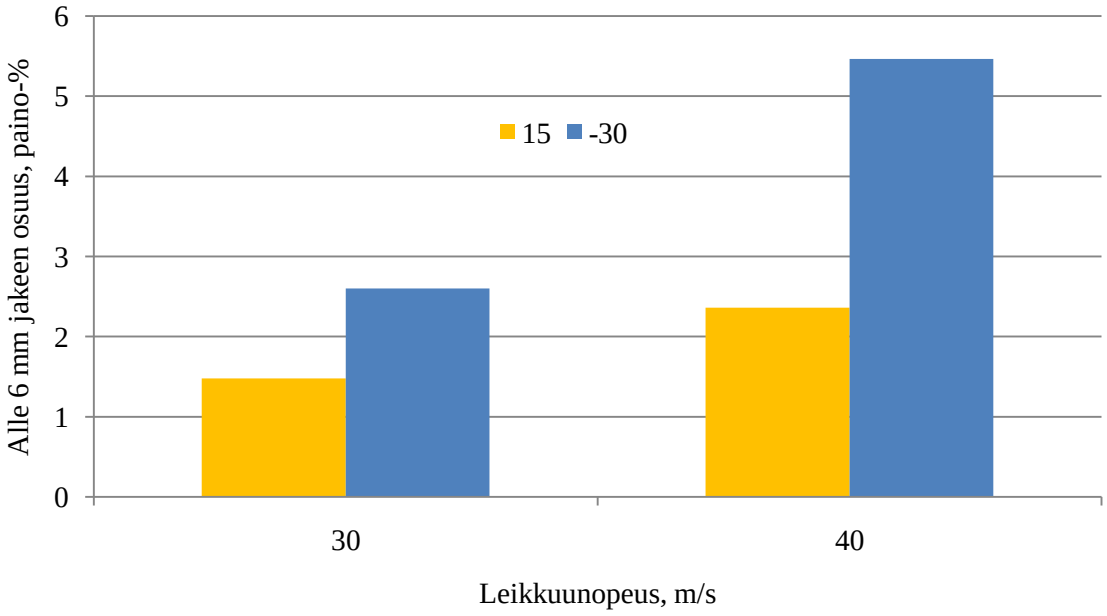
β = teräkulma, astetta.

Teräkulma on yleensä 33…38 astetta (Niiranen 1983, 2002). Teräkulman pienentäminen pienentää myös energiankulutusta, mutta nopeuttaa terän kulumista ja alttiutta lohjeta kiveniskemistä.

Pienimmillään leikkuuenergian kulutus on noin 0,5 kWh/m^3, mutta tylsillä terillä se voi olla yli 2,5 kWh/m^3. (Seppänen ym. 2002). Jos kaavaan sijoitetaan ”murskainmaisia” arvoja eli K = 5 mm ja β = 45 astetta, saadaan leikkuuenergiaksi 5,5 kWh/m^3 eli 2,7 kWh/MWh. Tämä pitää hyvin paikkansa joillekin murskaimille, joskin paljon pienempiäkin kulutuksia on mitattu.

Puun kosteuden ollessa alle syiden kyllästymispisteen, 24%, hienojakeen osuus ja haketuksen energiantarve kasvavat. Hienojakeen osuus lisääntyy myös kosteuden ollessa kyllästymispistettä suurempi, joten siltä kannalta optimaalinen haketuskosteus on juuri kyseinen 24%. (Dyrke ym. 1999, 53).

Hamelinck ym. (2003, 36) esittävät, että kuivan puun haketuksessa energiankulutus tulee kertoa 1,34:lla vastaavaan kostean puun haketukseen verrattuna. Ominaisenergiankulutusta lisäävät myös jäätyminen ja suuri leikkausnopeus (kuva 17) (Hartler & Stade 1977).



Kuva 17. *Puun jäisyyden ja leikkausnopeuden vaikutus alle 6 mm:n hienojakeen osuuteen hakkeessa. Selitteessä lämpötila, vasemmanpuoleiset tulokset sulalla, oikeanpuoleiset jäisellä puulla. (Hartler & Stade 1977).*

Palakoon monissa rumpuhakkureissa ja vasaramurskaimissa määrittää viimeisenä vaiheena seula, jonka reiät rajoittavat ylisuuren materiaalin pääsyä läpi. Tavara jauhautuu seulan ja terien välissä, kunnes se mahtuu seulan rei'istä. Seulan aukko-osuuden tulee olla mahdollisimman suuri, kuitenkin siten, että seulan mekaaninen kestävyys säilyy. Sekä pyöreitä että kulmikkaita reikiä käytetään. Liikaa hienontamista voidaan välttää valitsemalla suurempireikäinen seulaverkko, mutta tällöin myös suurien kappaleiden osuus murskeessa voi kasvaa haitallisen suureksi. Seulan paksuutta lisäämällä voidaan kuitenkin estää pitkien keppien sujahtaminen seulan läpi. Kaiken kaikkiaan seulan silmäkoon valinta on kompromissi energiankulutuksen ja palakoon välillä.

Seulan reikien pinta-alan tulee olla oikeassa suhteessa käytettävään tehoon. Yritys tunkea väkisin seulasta läpi liian suurta määrää johtaa energiankulutuksen kasvuun tuotettua yksikköä kohden. Näin on erityisesti hyvin kostealla raaka-aineella, josta saattaa tulla seulaa vasten jauhettaessa liisterimäistä, hyvin holvaavaa ja tukkivaa tahnaa. Ongelma tulee kuitenkin tavanomaisissa kosteuksissa konkreettiseksi lähinnä vain hienomurskauksessa, jota tarvitaan esimerkiksi hienonnettaessa tavaraa pelletinvalmistukseen tai hiilen pölypolttokattiloihin sopivaksi. Normaalilla polttohakkeella tämä on harvoin ongelma ja voidaan sanoa, että jos kosteus aiheuttaa ongelmia murskauksessa, virhe on tapahtunut jo korjuun ajoituksessa tai varastoinnissa.

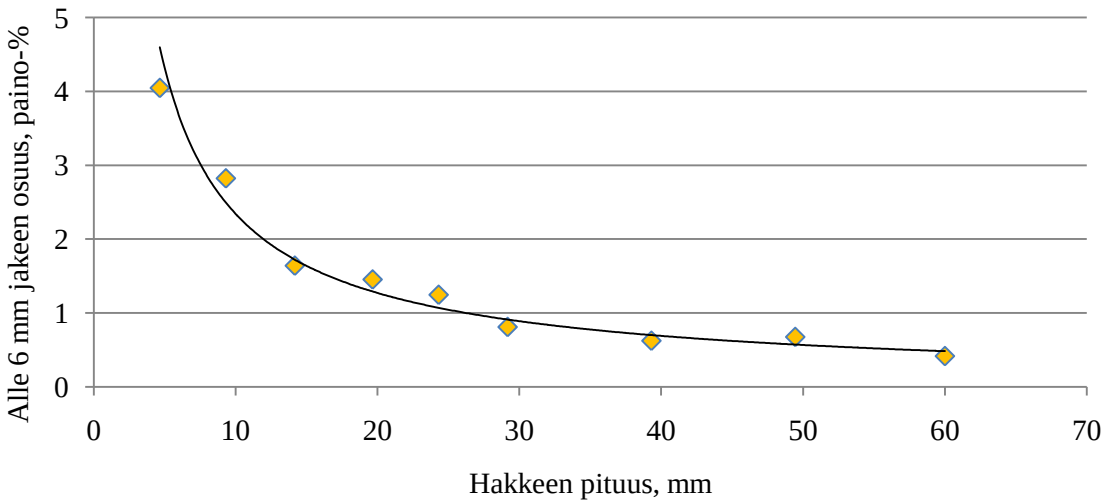
Seulaverkon vaikutusta palakokoon on tutkittu rumpuhakkurilla taulukon 5 mukaisin tuloksin (Lahti 1998). Taulukkoon on laskettu myös kaavalla 4 saatu haketuksen ominaisenergiankulutus. Seuloilla saadaan estettyä yli 10 cm:n pituisten tikkujen jääminen hakkeeseen käytännöllisesti katsoen kokonaan, mutta haketuksen energiankulutus kasvaa laskennallisesti noin 60%. Tutkitussa tapauksessa pullonkaula ei liene ollut moottoritehon riittävyys, joten tuottavuutta seulojen käyttö ei ole heikentänyt. Näin myös käytännön havaintojen mukaan, tosin tasauspätkillä ja rangalla seulojen lisäys huononsi tuottavuutta lievästi.

Taulukko 5. Hakkurin pohjaseulaverkon vaikutus palakokoon ja laskennalliseen haketuksen energiankulutukseen Evolution-hakkurilla sahapintojen haketuksessa (Lahti 1998).

	Keskimääräinen palakoko	Alle 3 mm hienoainesta, %	Yli 10 cm pitkiä tikkuja, %	Haketuksen laskennallinen mekaanisen energian kulutus, kWh/MWh
60*60 mm reiät	20	2	0,2	1,1
40*90 mm reiät	20	3	0,3	1,1
Ei pohjaseulaa	33	1	5	0,7

Rahaksi laskettuna kyseinen energiankulutusero seulojen ja seulattomuuden välillä, 0,4 kWh/MWh, on dieselmoottoria käytettäessä noin 7 snt/MWh eli ei kovin merkittävä. Tikuttomuus sen sijaan on monille laitoksille tärkeätä, joten tällä perusteella tiheänkin seulaverkon käyttö on hyvin perusteltua.

Toisaalta liian tiheä seula saattaa huonontaa tuottavuutta, jos moottoriteho loppuu kesken. Mitä lyhyempää haketta tehdään, sitä enemmän muodostuu sivutuotteena alle 6 mm hienoainesta ideaaliolosuhteissakin. Kuvassa 18 on esitetty hienojakeen määrä hakkeen pituuden mukaan hitaassa laboratoriohaketuksessa (Murto ja Kivimaa 1948).



Kuva 18. *Alle 6 mm:n hienojakeen osuuden riippuvuus hakepalasten pituudesta runkopuulla hitaalla haketusnopeudella (Murto ja Kivimaa 1948).*

Murskaimissa käytetään joskus paksua seulalevyä tai erityisiä poikittaisia lattarautoja seulan taakse kiinnitettyinä pitkien tikkujen läpimenon estämiseksi. Saman asian ajaisi seulaverkon silmäkoon pienentäminen, mutta samalla energiankulutus ja hienoaineksen määrä lisääntyy, jos seula on kovin tiheä.

Rummun kierroslukua suurentamalla voidaan haketuksen tuottavuutta periaatteessa lisätä. Kehänopeuden suurentaminen kovin suureksi kuitenkin lisää hienoaineksen osuutta, siis laventaa palakokojakaumaa ja suurentaa energiankulutusta ja teräkustannuksia, kuten kuvassa 19 esitettiin. Kustannusten, pölyävyyden ja tuotteen säilyvyyden kannalta tulisi tuottaa juuri haluttua palakokoa ja mahdollisimman vähän sitä hienompaa jaetta. Sopivana kehänopeuden ylärajana pidetään tältä kannalta noin 50 m/s, mutta suuremmallekin nopeudelle voi olla perusteita.

Kehänopeus on vaakasyöttöisissä, nopeakäyntisissä hakkureissa ja murskaimissa noin 30-50 m/s, kaukalomurskaimissa enemmän, noin 100 m/s. Kaukalomurskaimissa käytettäneen suuria nopeuksia mm. siksi, ettei syöttöaukossa vapaasti roottorin päälle painuva materiaali lähtisi pois alta murskausvasaran iskun saadessaan, vaan massan hitauden vuoksi olisi siinä määrin paikallaan, että palan irrottaminen onnistuu.

Hidaskäyntinen, järeä voimalaitosmurskain tekee pienen kehänopeutensa vuoksi periaatteessa vähän hienoainesta, mikä pienentää hienontamisen energiankulutusta. Toimintaperiaate huonontaa kuitenkin tilannetta, sillä kyseisissä murskaimissa materiaalien hienontaminen perustuu siihen, että pyörivällä rummulla olevat terät menevät kampamaisten vastaterien väleistä, jolloin terän ja vastaterän välille muodostuu suuri kitka ja häviöitä tätä kautta. Hamelinckin ym. (2003, 36) mukaan tällaisen murskaimen energiankulutus samalla lopputuotteen palakoolla onkin kaksinkertainen hakkurintyyppisellä periaatteella toimivaan murskaimen verrattuna. Lisäksi hidaskäyntisissä murskaimissa yleisesti käytetty hydraulinen voimansiirto lisää häviöitä nopeakäyntisten laitteiden mekaaniseen voimansiirtoon verrattuna. Optimaalisessa toimintapisteessään hydraulisen voimansiirron hyötysuhde on noin 85%, mutta käytännössä vähemmän.

Oksa- ja latvusmassanippujen murskauksessa hidaskäyntisellä murskaimella on keskimääräinen palakoko ollut 19 mm (Kaipainen 1998). Jos tämä sijoitetaan kaavaan 4, saadaan murskaimen energiankulutukseksi 1,2 kWh/MWh. Ottaen kuitenkin toimintaperiaatteen huomioon, on tulos kerrottava kahdella. Saatu 2,4 kWh onkin samaa suuruusluokkaa käytännön havaintojen kanssa.

Autoalustaisen hakkurin dieselin tai kevyen polttoöljyn kulutuksena on nyrkkisääntönä pidetty perinteisestä yhtä litraa tuotettua hakekuutiometriä kohden eli 1,25 l/MWh. Tämä

pitää yleisesti ottaen yhä paikkansa. Itse haketuksen energiankulutus on vain osa tästä. Hakkeen puhallin, kuormain ja hakkurin siirtyminen haketuspaikkojen välillä vievät suurimman osan kokonaisenergiasta. Kotimaiset Energiat Ky Pekka Lahden Future-hakkurin seurannassa polttoaineenkulutus oli 0,7 litraa/hakeirto-m^3, josta hakkuri vei 0,4 litraa ja auto 0,3. Keskimääräinen palakoko oli noin 20 mm. (Ikäheimo & Asikainen 1998, 15-18). MWh:a kohden kulutukset olisivat noin 0,5 ja 0,4 litraa eli mekaanisena energiana noin 1,7 ja 1,3 kWh/MWh.

Pienen TT 54 R-rumpuhakkurin tutkimuksessa saatiin mekaanisen energian kulutukseksi lepällä 3,0 kWh/m^3 eli 1,5 kWh/MWh ja koivulla 3,5 kWh/m^3 eli 1,4 kWh/MWh. Raaka-aineet olivat sekä sulia että jäisiä. Palakoko oli pieni, nimellispituus oli alle 10 mm. (Kalaja 1988).

Selluhakkeen teossa haketuksen energiankulutus on havupuilla noin 8,5 MJ/m^3 eli 1,2 kWh mekaanista energiaa/tuotetun polttoaineen MWh ja koivulla 12,5 MJ/m^3 eli 1,4 kWh/MWh. Hakkeen keskimääräinen palakoko on tällöin noin 20 mm. (Niiranen 1983, 186 ja 206).

Energiankulutus vaikuttaa palakoko huomioiden selluhakkeen teossa suurehkolta, varsinkin kun otetaan huomioon, että kyseessä on teräväteräinen hakkuri. Toisaalta haketettava puu on selluhakkeen teossa kuorittua, pelkkää ”kovaa” puuta, jolloin vaadittava haketustyö on suurempi kuin paljon helposti murtuvaa kuorta ja pieniä oksia sisältävän energiapuun haketuksessa. Lisäksi selluhakkeen teossa käytetty laikka- tai kiekkohakkuri puhaltaa hakkeen kiekon takapuolelle asennetuilla siivillä suurella nopeudella (esim. 50 m/s) eteenpäin, mikä kuluttaa melko paljon energiaa. Puhaltimen kulutus sisältyy mainittuihin selluhakkeen teon kulutuslukemiin.

Tiihonen ja Korpi (2003) kehittivät kaksivaiheista murskausta pääasiassa epäpuhtaille ja hankalasti syötettäville materiaaleille. Linjastossa oli karkeaa palakokoa tekevä esimurskain, seula hienoaineksen erottamiseksi ja jälkimurskain seulan ylitteen hienontamiseksi. Murskaimien yhteenlaskettu sähköenergiankulutus oli oksa- ja latvusmassalla 0,8 kWh/MWh tuotettua polttoainetta, kun keskimääräinen palakoko oli 14 mm. Pelkän esimurskaimen kuluttama energia oli puolet tästä. Koko linjaston kuluttama sähköenergia oli 1,5 kWh/MWh. Tähän sisältyvät murskaimet, kuljettimet ja linjaa syöttävä puutavara-

kuormain. Jos laitteita olisi käytetty dieselmoottorilla, polttoöljynkulutukset olisivat vastaavasti olleet noin 0,2 pelkille murskaimille ja 0,4 litraa/MWh koko linjalle. Murskaimien pieni kulutus selittynee muun muassa seulan käytöllä, millä esimurskauksessa pienellä energialla irronnut hienoaines saadaan pois kuluttamasta tarpeettomasti energiaa jälkimurskauksessa.

Karkeaa mursketta tekevä hidaskäyntinen Morgårdshammar-murskain käytti valmistajan mukaan mekaanista energiaa noin 2 kWh yhden murske-MWh:n tuottamiseen. Keskimääräinen palakoko oli noin 40 mm. Tässäkin energiankulutus on palakokoon nähden suurehko, mutta se selittynee murskan toimintaperiaatteella, joka on hidaskäyntiselle murskaimelle tyypillinen sormimainen terä-vastaavasti uritettu vastaterä-asennelma. Kulutuksessa ovat lisäksi mukana myös syöttävä puutavarakuormain ja valmiin murskeen hihnakuljetin. (Vehmas ym. 1983, 55 ja liite 7).

Dieselpolttoaineen kulutus puutavaran kuormauksessa tai purkamisessa on noin 7 litraa tunnissa. Hakkurin tai murskaimen syötössä kulutuksen voidaan olettaa olevan suurin piirtein saman. Tässä on peruslaskennassa oletettu työn tuottavuudeksi 75 - 170 MWh kuormaimen käyttötuntia kohden. Polttoaineesta laskien kulutus on siis 0,04 - 0,09 litraa/MWh vastaten mekaanisena energiana 0,1 - 0,3 kWh/MWh, jos moottorin hyötysuhde on 33%.

Syöttölaitteen energiankulutus on varsin pieni. Erillisellä koesyöttölaitteella saatiin syötön mekaanisen energian kulutukseksi noin 0,05 kWh/MWh. Tähän sisältyvät yläsyöttörulla ja alapuolinen 3,7 metriä pitkä lamellikuljetin. (Leinonen ym. 1998).

Mobiilihakkureissa on yleensä puhallin hakkeen siirtämiseksi hakkurin alta kuljetusauton kuormatilaan tai maahan. Puhallin on suurehko energiankuluttaja. Rannan (2002, 6) tutkimuksessa puhaltimen tehotarpeeksi saatiin 30 kW, kun hihnakuljettimen vaatima teho oli vain kymmenesosa tästä ja hihnakuljettimen heittimellä tehostettunakin vain neljäsosa. 30 kW:lla dieselmoottorista voimansa saava puhallin kuluttaisi öljyä 12 litraa tunnissa, siis 0,15 litraa/tuotetun polttoaineen MWh, jos hakkurin tuottavuus puhaltimen käynnissäoloaikana olisi keskimäärin 80 MWh/h. Puhallin lienee kuitenkin nähty käytössä helpommaksi, päätellen sen yleisyydestä hakkureissa. Murskaimissa on yleensä hihnakuljetin.
Taulukkoon 6 on koottu energiankulutuksien jakaumia hakkureilla ja murskaimilla.

Taulukko 6. Hakkureiden ja murskaimien energiankulutuksen jakaumia. Yksikkö on kWh mekaanista energiaa/MWh tuotetun polttoaineen energiaa, paitsi viimeisellä rivillä.

	Nopeakäyntinen hakkuri välivarastolla	Nopeakäyntinen murskain terminaalilla	Hidaskäyntinen murskain, suora syöttö autosta
Syöttökone, esim. kuormain	0,2 - 0,3	0,1 - 0,3	-
Syötin, esim. kuljetin	0,05	0,05	0,1
Haketus tai murskaus	1 - 2 (laskennassa 1,7)	1 - 4 (laskennassa 2)	2 - 5 (laskennassa 3)
Poistokuljetin tai hakepuhallin	0,3 - 0,4	0,05 - 0,1	0,1
Siirtymiset työmaiden välillä ja muu ajo	0,4	0,1	-
Yhteensä, kWh/MWh	2,7 - 2,9	2,3 - 2,6	3,2
Yhteensä, litraa/MWh	0,8 - 0,9	0,7 - 0,8	(1,0)

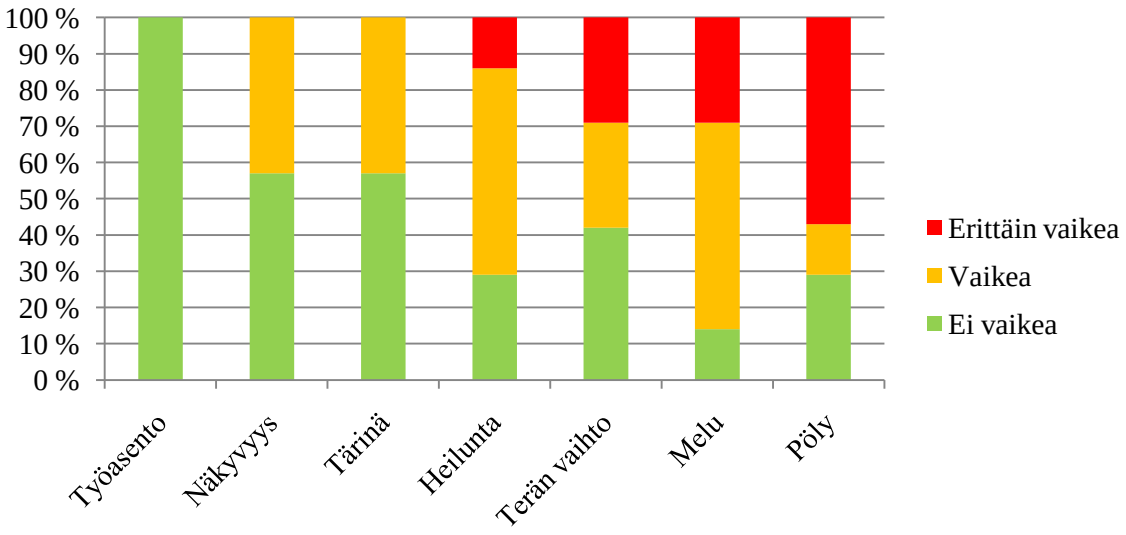
Verrattuna käytännön kokemuksiin, joiden mukaan välivarastohakkuri kuluttaa noin yhden litra polttoöljyä/tuotettu hakeirtokuutiometri eli noin 1,2 l/MWh, tässä laskettu kulutus on pienehkö. Kun kuitenkin otetaan huomioon, että

- varastokoko on tässä keskimääräistä suurempi, koska kyse on pienpuusta ja suuren mittakaavan tuotannosta
- haketuksen tuottavuus on suurempi kuin esimerkiksi oksa- ja latvusmassalla, jolloin apulaitteiden kulutus tuoteyksikköä kohden on pienempi,

saatu tulos on linjassa aiempien havaintojen kanssa.
Hidaskäyntisen murskan suurehkon energiankulutuksen syitä ovat kitkahäviöitä aiheuttava murskausperiaate ja samoin häviöitä aiheuttava hydraulinen voimansiirto.

7.7 Pölyntorjunta

Hakkilan (1984, 63) mukaan hakkurin kuljettajat ovat kokeneet erilaiset haketuksen työ-ympäristön vaikeudet merkittävyydeltään kuvan 19 mukaisiksi.



Kuva 19. *Hakkurin kuljettajien kokemia ergonomisia haittoja työssään 80-luvun alussa (Hakkila 1984, 63). Nykytilanne voi olla etenkin näkyvyyden ja melun kannalta parempi, mutta suuntaa-antavia nämä havainnot yhä ovat.*

Kuivalla puulla pölyäminen saattaa olla suuri haitta sekä työn sujuvuuden että työntekijöiden terveyden kannalta. Kuivaa lastulevyä, vaneritehtaan puujätteitä, kantoja, ruokohelpiä ja vastaavaa murskattaessa pöly voi olla niin paha ongelma, että ellei sitä torjuta mitenkään eikä tuuli puhalla poispäin, pöly voi estää työn kokonaan olemalla näköesteenä, tukkimalla jäähdyttäjiä, aiheuttamalla palovaaran ja häiritsemällä mahdollisesti lähiympäristössä olevia ihmisiä. Viimeksi mainitusta syystä murskaus voimalaitoksella voi joissakin tapauksissa olla huono vaihtoehto.

Yksi tapa rajoittaa pölyämistä on sulkea toiminnat halliin. Tällöin kuitenkin hallissa olevat työntekijät saattavat altistua varsin suurille pölyssä olevien haitallisten aineiden pitoisuuksille. Purettaessa oksa- ja latvusmassaa ja kantoja murskaimelle hallissa on mitattu 10-20-kertaisia endotoksiinipitoisuuksia suositeltuun raja-arvoon nähden. Samaa tavaraa kuormattaessa pitoisuudet olivat suurin piirtein raja-arvon tasolla. (Ajanko-Laurikko ja Fagernäs 2007).

Pienpuulla on kuitenkin mitattu huomattavasti pienempiä pitoisuuksia. Mesofiilisiä sieniä on pienpuuhakkeesta mitattu vain sadasosan pitoisuuksia oksa- ja latvusmassahakkeeseen nähden, mutta toisaalta mesofiilisiä bakteereita on ollut yhtä paljon. Kasojen peittäminen on tässäkin mielessä suositeltavaa, sillä peittäminen pienensi varastokasojen sienipitoi-

suuksia lähes kolmasosaan ja bakteeripitoisuuksia lähes viidesosaan peittämättömiin kasoihin verrattuna. Mikrobipitoisuudet olivat kaikesta huolimatta kuitenkin sen verran suuria tässäkin tapauksessa, että asia on huomioitava haketuksessa. (Hillebrand 2004).

Turvepölyn pölyräjähdysvaara kasvaa jyrkästi, kun kosteus on pienempi kuin 35-40%. Kosteuden vaikutus puupölyllä lienee samaa luokkaa. Haketuksessa syntyvää pölyä kertyy kaikille pinnoille ja esimerkiksi 5 mm puupölykerros syttyy 300 asteen lämpötilassa. (Rautalin 1987, 16 ja 26). Tämä lämpötila voi ylittyä ennen kaikkea dieselmoottorin pakoputkiston pinnalla ja siksi sähkömoottorikäytön voi todeta myös tässä mielessä olevan parempi vaihtoehto. Varsinkin kosteudeltaan alle 30-prosenttinen pöly voi syttyä myös kipinästä, joka tulee syötteen seassa olevien kivien tai metallin kipinöidessä murskaimessa. Metsäpolttoaineetkin ovat toisinaan näin kuivia ja on myös huomattava, että keskikosteudeltaan märemmissäkin erissä on kuivia kohtia. Pölyämisen kannaltakin myös liiallista hienontamista on vältettävä.

Pölyämistä voidaan vähentää laitteiden hidaskäyntisyydellä, koteloinnilla, sumuttamalla vettä murskauskammioon tai imemällä ilmaa murskauskammiosta ja suodattamalla se syklonilla ja/tai tekstiilisuodattimella ennen johtamista ulkoilmaan. Oikein rakennettu imu suodattimineen on tehokas pölyn leviämisen estäjä. Puupölyn imu on yleisesti käytettyä tekniikkaa esimerkiksi puusepänteollisuudessa, mutta tässä tapauksessa on otettava huomioon kostean hienoaineen pyrkimys tarttua pintoihin. Karkea hinta-arvio pölynsidonnalle on 5-10 snt MWh, sisältäen laiteinvestoinnin ja puhaltimen kuluttaman sähkön. Laitteet ovat sen verran suuria, ettei niiden asentaminen mobiilihakkureihin tai -murskaimiin on vaikeata. Hyväksymällä suuri painehäviö suodattimilla ja siten puhaltimen suuri tehonkulutus voidaan suodattimien kokoa tosin pienentää.

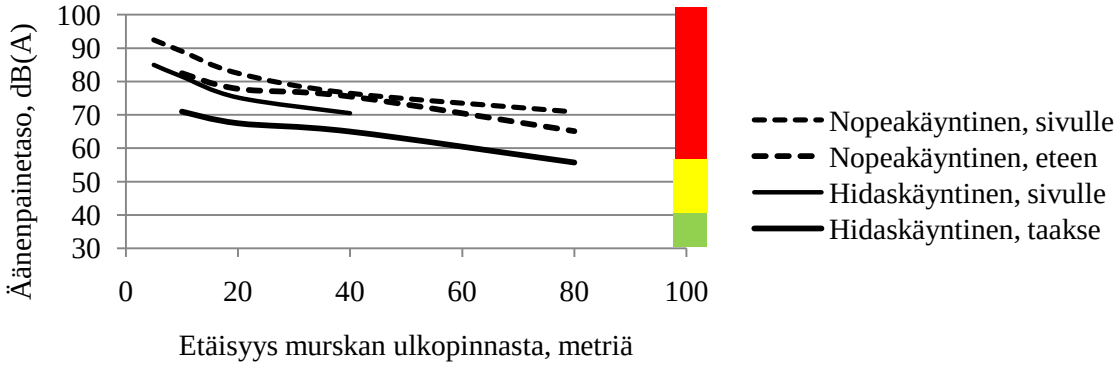
Palonehkäisyyn ja pölynsidontaan käytetään toisinaan jatkuvaa vesisumutusta, joka lisää polttoaineen kosteutta oikein säädettynä noin 0,5 %-yksikköä. Tarkoitus ei ole siis kastella puuta, vaan sitoa leijuvat pölyhiukkaset hienojakoiseen, tiivistyvään vesisumuun. Kyseisen vesimäärän haihduttamiseen kattilassa kuluu energiaa noin 0,2 % polttoaineen energiasisällöstä , toisin sanoen noin 4 sentin edestä/MWh. Merkittävä rajoite tämän menetelmän käytössä on putkien ja suuttimien jäätyminen, joten talvella tulee käyttää jotakin muuta keinoa. Toisaalta veden voi lämmittää esimerkiksi moottorin hukkalämmöllä.

Hidaskäyntisissä murskaimissa pölyongelma on vähäisempi, mutta on huomattava, että jo raaka-aineen kuormainkäsittelyssäkin haitallisia aineita pääsee työtekijöiden hengittämään ilmaan. Erityisesti jos murskain on hallissa, suodattimia, tehokasta ilmanvaihtoa tai muita keinoja olisi käytettävä. Mainitut suuret pitoisuudet hallissa koskivat juuri hidaskäyntistä murskainta.

7.8 Meluntorjunta

Hakkurit ja murskaimet meluavat siten, että asia on otettava huomioon käytännön toiminnassa. Dieselmoottorikäyttöisen laitteen vieressä, kolmen metrin päässä äänenpainetaso on noin 100 dB työskentelyn aikana. Vielä 100 metrin päässäkin avoimessa maastossa äänenpainetaso on noin 70 dB. Kun suurimmat sallitut tasot rakennusten pihoilla ovat 40-55 dB paikasta ja ajankohdasta riippuen, ovat suojaustoimet tarpeen ennen kaikkea voimalaitoksilla ja joskus myös terminaaleilla toimittaessa. Välivarastohaketuksessa häiriintyvää asutusta ei välttämättä ole, mutta esimerkiksi metsien virkistyskäyttöä melu voi haitata merkittävästi.

Kuvassa 21 on esimerkkejä murskainmelusta ja melun vaimenemisesta tietyillä etäisyyksillä (Rinne 2006b). Vaimeneminen avoimessa maastossa on periaatteessa 6 dB aina etäisyyden kaksinkertaistuessa, mutta paikalliset maastoesteet ja maanpinnan akustiset ominaisuudet luonnollisesti vaikuttavat vaimenemiseen. Mukana ovat myös murskaimia syöttäneet autoalustaiset kuormaimet.



Kuva 21. *Hidas- ja nopeakäyntisen, dieselmoottorikäyttöisten murskaimen aiheuttamia äänenpainetasoja terminaalissa (Rinne 2006b). Melun vuoksi nopeakäyntisen murskaimen tapauksessa etäisyyden asutuksesta on oltava vähintään noin 500 metriä, ellei melua vaimenneta tai se vaimennu meluseinämin tai maastoestein.*

Hakkurin ja murskaimen aiheuttaman melun painopiste on alemmilla keskitaajuuksilla. Matalahkoon päähän painottuvan jakauman vuoksi kasvillisuuden vaimennus vaatii tiheää metsää leveän kaistan kuulijan ja äänilähteen välillä. 1000 Hz:n taajuutta vaimentaa 100 metrin havumetsäkaista 13 dB, mutta tätä matalammilla äänillä vaimennus jää pieneksi.

Maastoesteet, rakennukset ja muut vastaavat estävät äänen kulkeutumista. Esimerkiksi viisi metriä korkean maavallin melua vaimentava vaikutus on noin 5 dB silloin kun kuulija on äänilähteen ja vallin yläreunan kautta ajatellulla linjalla vallin takana. Jos kuulija on tämän linjan alapuolella, on käytännön vaimennus tavallisesti noin 10 dB ja korkeintaan 20 dB. Murskainmelun vaimentamiseen sopiva raskas meluaita, jossa on maatäyte ja molemmin puolin puuvuoraus, maksaa noin 200 euroa/aitaneliömetri (Tiehallinto 2002). Samaa luokkaa tai hiukan kalliimpi on betoniseinä sopivalla vaimennusmateriaalilla varustettuna.

Terminaali pienentää metsävarastohaketuspaikoilta kuuluvaa melua, mutta toisaalta lisää sitä terminaalin ympäristössä. Terminaalin enemmän tai vähemmän kiinteän luonteen vuoksi hakkurin ympärille voidaan kuitenkin tarvittaessa rakentaa helpommin melunsuojarakenteita kuin mobiilihakkurin tapauksessa.

Jos murskain ympäröidään toiselta sivultaan ja molemmista päistään meluaidalla, korkeudeltaan vähintään 5 metriä, saavutetaan melko tehokas vaimennus (noin 10 dB) aidan suuntaan, sitä tehokkaampi, mitä lähempänä murskainta aita on. Tällaisen aidan hinta, jos korkeus on 5 metriä ja kokonaispituus 25 metriä, maksaa noin 30 000 euroa. Mikäli paikalla käsitellään vuodessa 50 GWh puupolttoainetta, on aidan kustannus noin 1 snt/MWh eli varsin pieni. Käytännössä suurempi haitta voi olla se, että aita sitoo murskaimen yhteen paikkaan, joten sekä raaka-aine että valmis murske on siirrettävä pyöräkuormaajalla. Tätä tosin voi joutua tekemään joka tapauksessa.

Melua voidaan torjua myös rakentamalla halli, johon toiminta sijoitetaan. Erään halliin sijoitetun hidaskäyntisen murskaimen ja murskalle purkavan auton aiheuttamaksi äänenpainetasoksi hallin ulkopuolella, 10 metrin päässä seinästä laskettiin 64 dB. Mittaustulos oli keskimäärin 65 dB, mutta kun otetaan huomioon taustamelu 57 dB, saadaan kyseinen tulos. Hallin aikaansaaman vaimennukseen arvioitiin olevan noin 10 dB. Halli oli eristämä-

tön, teräsprofiililevyrakenteinen. Lämpö- ja äänieristyksellä tai betonirakenteilla ja tiiviillä ovilla vaimennusta saataisiin vielä paremmaksi.

Huomioitava on kuitenkin, että osin homehtuneesta puusta, jota energiapuu usein on, pölisee ilmaan haitallisia aineita, jotka hallissa jäävät avotilaa heikomman ilmanvaihtuvuuden vuoksi huonontamaan ilmanlaatua.

8 HAKETUKSEN JA MURSKAUKSEN KOKONAISKUSTANNUKSET

Seuraavassa on esitetty taulukkomuodossa pieniläpimittaisen kokopuun haketuksen ja murskauksen kustannuksia edellä esitetyin perustein. Tyyppitapausten pohjana ovat taulukossa 4 esitetyt tiedot. Muilta osin tiedot käyvät ilmi laskelmista.

Siirrettävien laitteiden kestoiäksi on oletettu 8000 hakkurin tai murskaimen käyttötuntia, kiinteiden 15 vuotta vuosimäärästä riippumatta. Tämä selittää sen, miksi siirrettävät laitteet ovat vähemmän herkkiä vuosimäärien muutoksille. Toisaalta jos määrät ovat suuria, kiinteiden laitteiden järeys ja pitkäkestoisuus pääsevät oikeuksiinsa.

8.1. Haketuksen kokonaiskustannukset

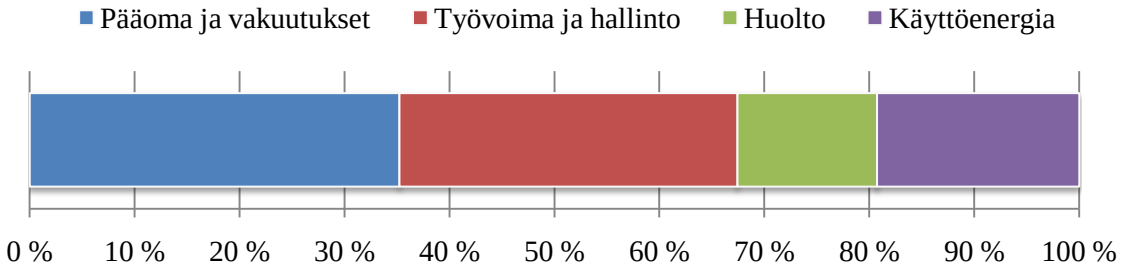
8.1.1 Keskikokoinen hakkuri välivarastolla

Laskennalliset haketuskustannukset on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Pienpuun haketuskustannukset keskikokoisella, autoalustaisella hakkurilla välivarastolla. Investointitukea, 20-25%, ei ole huomioitu laskelmassa.

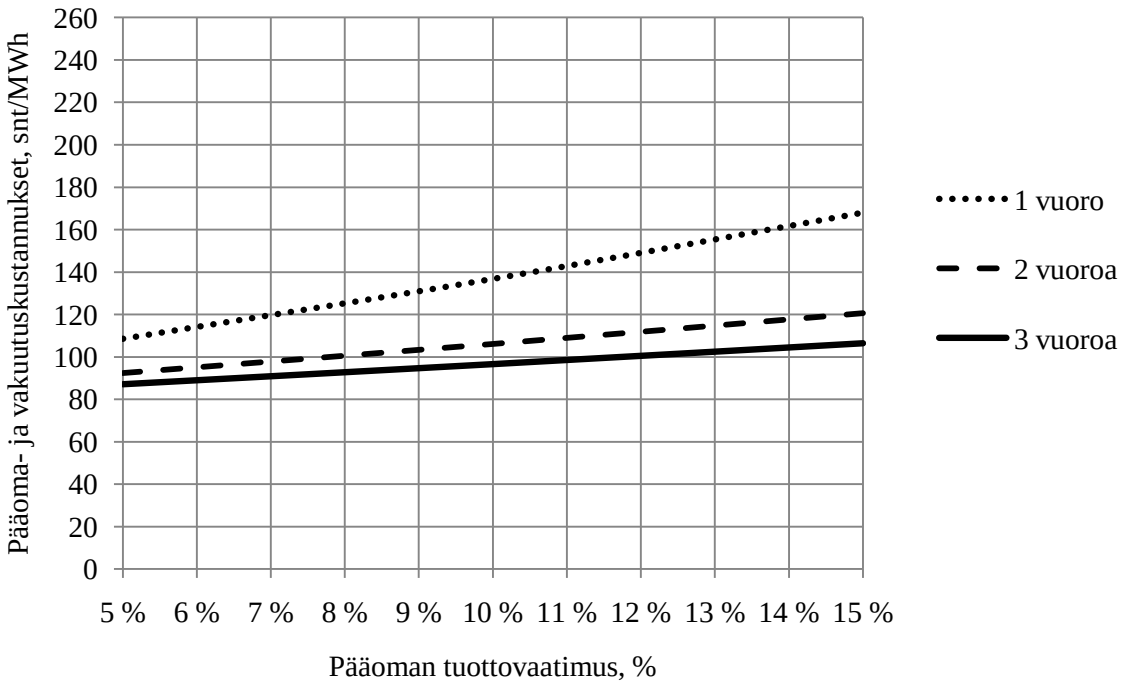
	snt/MWh	Peruste
Pääoman poisto ja korko	102	450 000 e, 6,7 vuotta, 10%, ei jäännösarvoa
Vakuutukset	4	1% investoinnista/a, 110 GWh/a
Työvoima	79	3400 h/a, 25 e/h, 110 GWh/a
Hallinto	18	2 h/leimikko, 30 e/h, 330 MWh/leimikko
Terät ja seulat	25	kokemusperäinen arvio
Muut huolto	15	kokemusperäinen arvio
Käyttöenergia	58	0,9 l/MWh, 60 snt/l, voiteluaine 8% tästä
Odottamaton	15	5%, vauriokorjaukset ym.
Haketus yhteensä	316	

Kuvassa 22 on esitetty kustannusjakauma kustannuslajeittain.

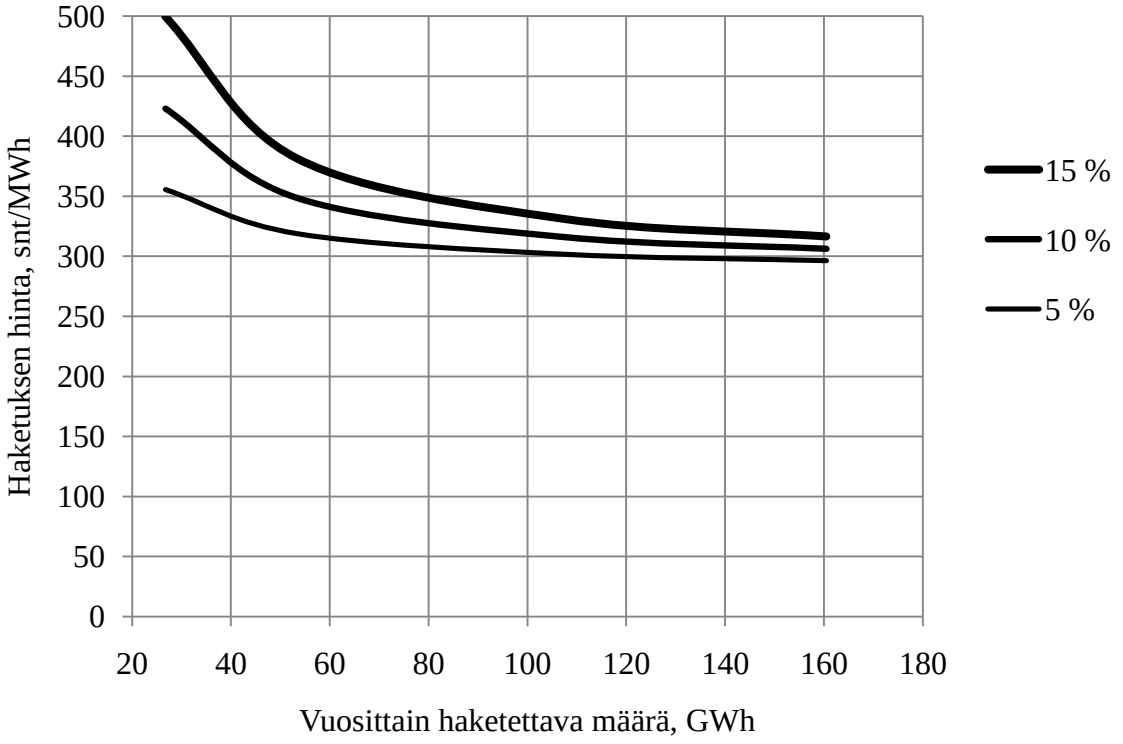


Kuva 22. *Kustannusten jakautuminen pienpuun haketuksessa keskikokoisella, autoalustaisella hakkurilla välivarastolla kahdessa vuorossa toimittaessa.*

Herkkyystarkastelussa tutkitaan vuotuisen käyttömäärän ja laskentakoron eli pääoman tuottovaatimuksen muutosten vaikutusta pääoma- ja vakuutuskustannuksiin MWh:a kohden sekä vuosituotannon vaikutusta kokonaiskustannuksiin, kuvat 22 ja 23.



Kuva 22. *Pääoma- ja vakuutuskustannukset vuotuisen käyttömäärän ja pääoman tuottovaatimuksen mukaan pienpuun haketuksessa keskikokoisella, autoalustaisella hakkurilla välivarastolla. 1 vuoro = 1700 työtuntia, 2 vuoroa = 3400 työtuntia, 3 vuoroa = 5100 palkallista työtuntia vuodessa.*



Kuva 23*. Haketuksen kokonaiskustannukset vuosimäärän mukaan. Tuotos kahdessa vuorossa 110 GWh/a. Selitteessä pääoman tuottovaatimus.*

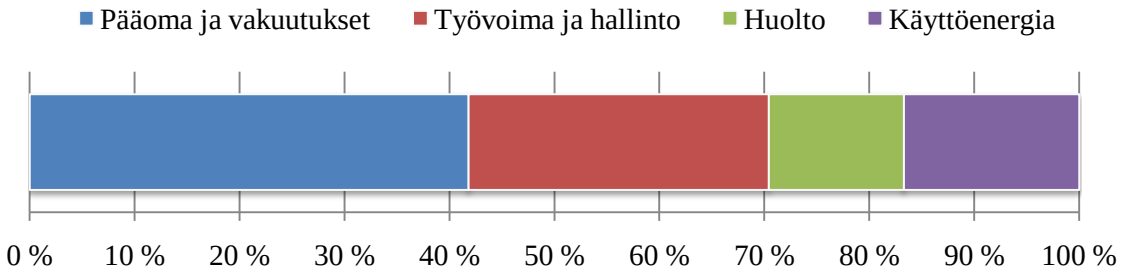
8.1.2 Suuri hakkuri välivarastolla

Laskennalliset haketuskustannukset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Pienpuun haketuskustannukset suurella, autoalustaisella hakkurilla välivarastolla. Investointitukea, 20-25%, ei ole huomioitu laskelmassa.

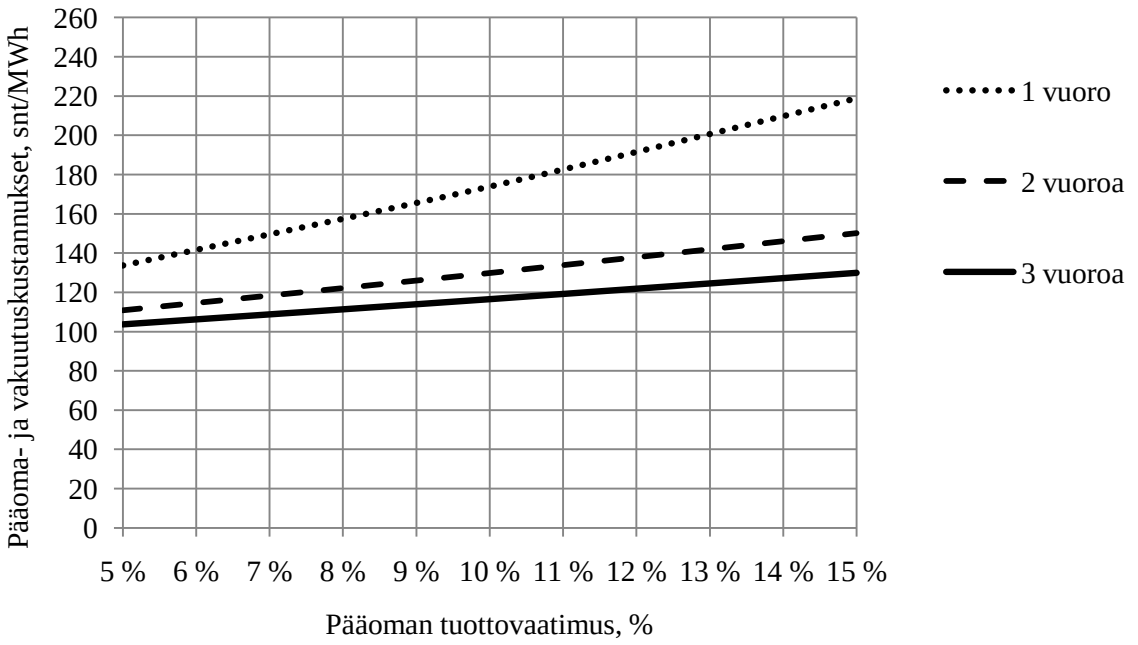
	snt/MWh	Peruste
Pääoman poisto ja korko	124	700 000 e, 7,6 vuotta, 10%, ei jäännösarvoa
Vakuutukset	6	1% investoinnista/a, 120 GWh/a
Työvoima	71	3400 h/a, 25 e/h, 120 GWh/a
Hallinto	18	2 h/leimikko, 30 e/h, 330 MWh/leimikko
Terät ja seulat	25	kokemusperäinen arvio
Muut huolto	15	kokemusperäinen arvio
Käyttöenergia	52	0,9 l/MWh, 60 snt/l, voiteluaine 8% tästä
Odottamaton	16	5%, vauriokorjaukset ym.
Haketus yhteensä	327	

Kuvassa 24 on esitetty kustannusjakauma kustannuslajeittain.

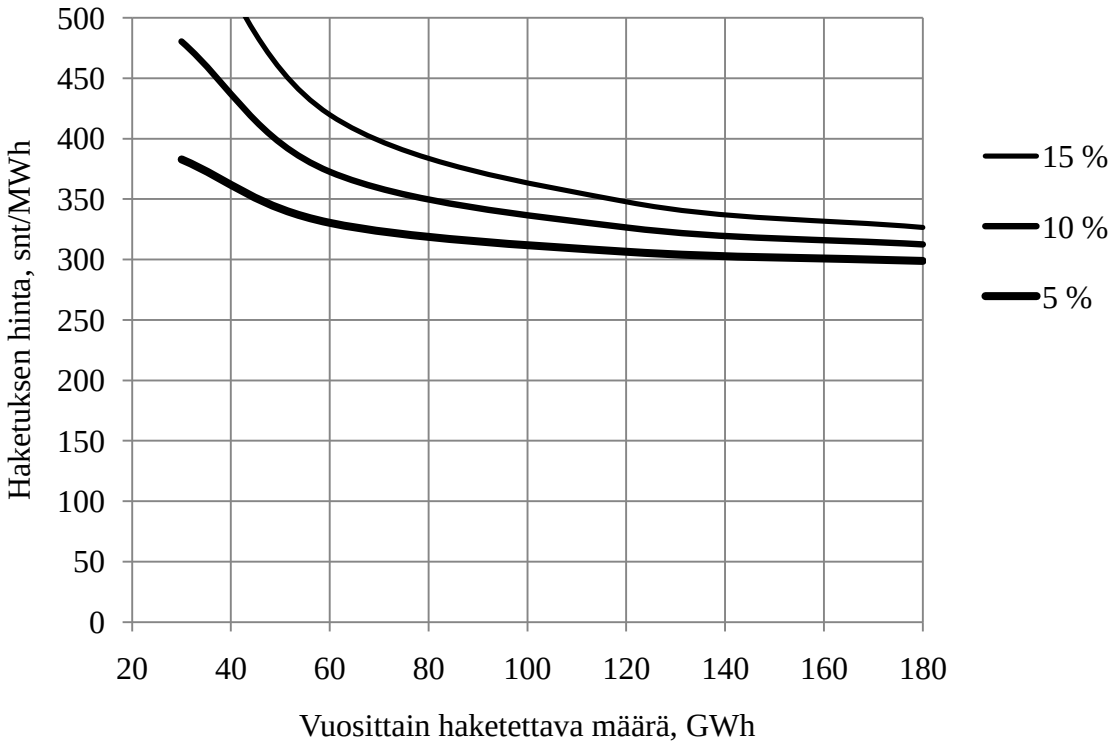


Kuva 24. *Kustannusten jakautuminen pienpuun haketuksessa suurella, autoalustaisella hakkurilla välivarastolla kahdessa vuorossa toimittaessa.*

Herkkyystarkastelussa tutkitaan vuotuisen käyttömäärän ja laskentakoron eli pääoman tuottovaatimuksen muutosten vaikutusta pääoma- ja vakuutuskustannuksiin MWh:a kohden sekä vuosituotannon vaikutusta kokonaiskustannuksiin, kuvat 25 ja 26.



Kuva 25. *Pääoma- ja vakuutuskustannukset vuotuisen käyttömäärän ja pääoman tuottovaatimuksen mukaan pienpuun haketuksessa suurella, autoalustaisella hakkurilla välivarastolla. 1 vuoro = 1700 työtuntia, 2 vuoroa = 3400 työtuntia, 3 vuoroa = 5100 palkallista työtuntia vuodessa.*



Kuva 26*. Haketuksen kokonaiskustannukset vuosimäärän mukaan. Tuotos kahdessa vuorossa 120 GWh/a. Selitteessä pääoman tuottovaatimus.*

8.2. Murskauksen kokonaiskustannukset

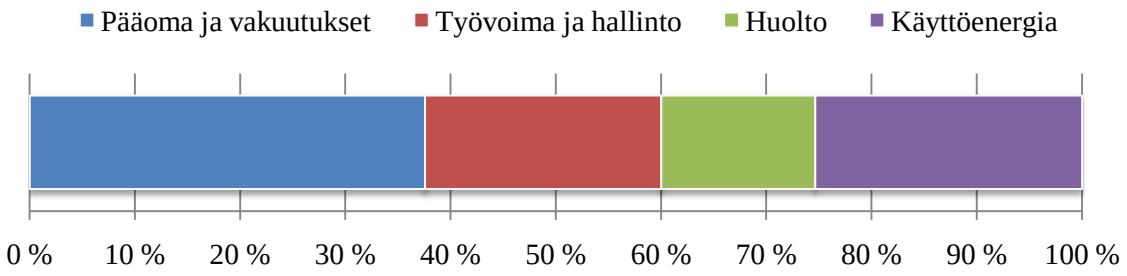
8.2.1 Keskikokoinen murskain terminaalissa

Laskennalliset murskauskustannukset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Pienpuun murskauskustannukset keskikokoisella, puoliperävaunuisella murskaimella terminaalissa. Investointitukea, 20-25%, ei ole huomioitu laskelmassa.

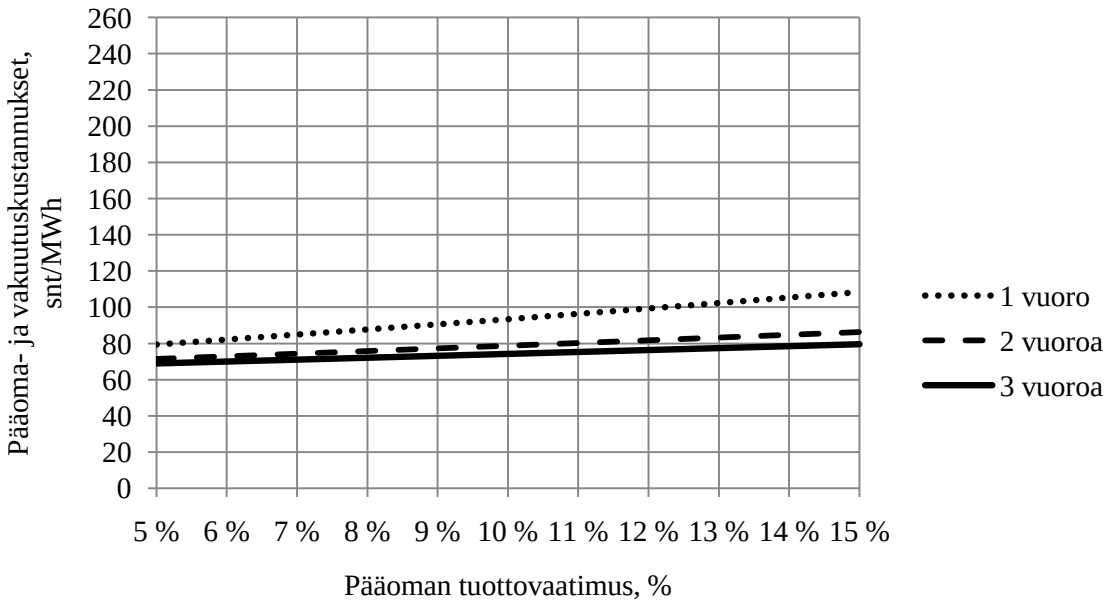
	snt/MWh	Peruste
Pääoman poisto ja korko	75	450 000 e, 3,4 vuotta, 10%, ei jäännösarvoa
Vakuutukset	2	1% investoinnista/a, 210 GWh/a
Työvoima	40	3400 h/a, 25 e/h, 210 GWh/a
Hallinto	6	4 h/varasto, 30 e/h, 2000 MWh/varasto
Terät ja seulat	15	kokemusperäinen arvio
Muut huolto	15	kokemusperäinen arvio
Käyttöenergia	52	0,9 l/MWh, 60 snt/l, voiteluaine 8% tästä
Odottamaton	10	5%, vauriokorjaukset ym.
Murskaus yhteensä	215	

Kuvassa 27 on esitetty kustannusjakauma kustannuslajeittain.

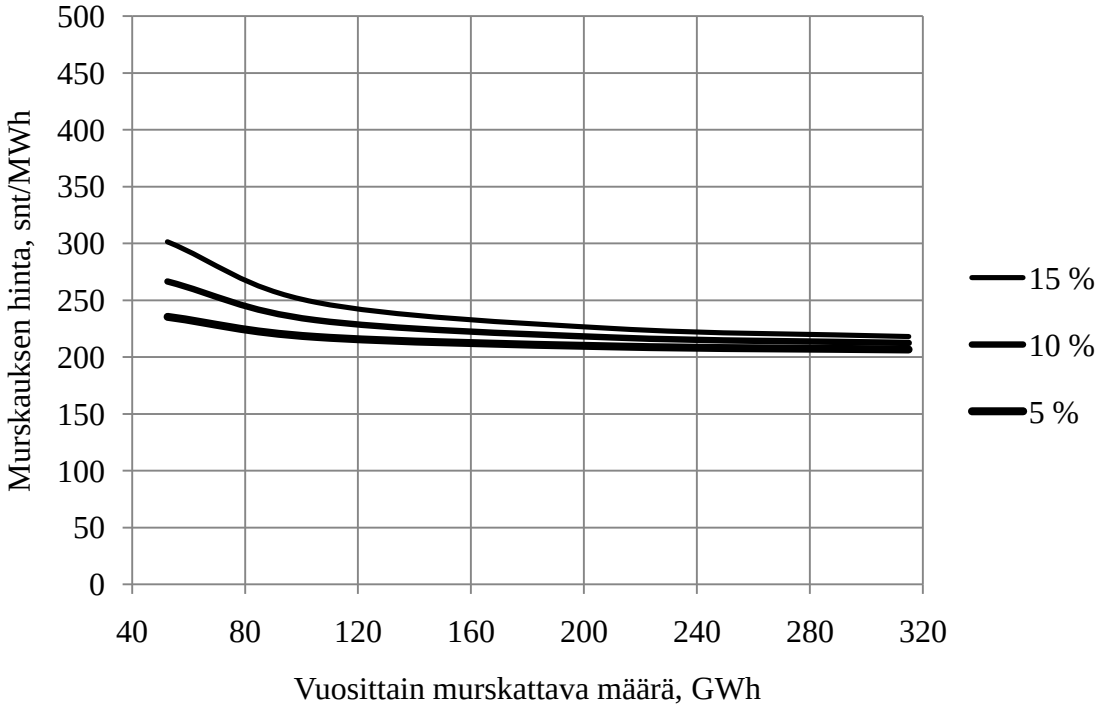


Kuva 27. *Kustannusten jakautuminen pienpuun murskauksessa keskikokoisella, puoliperävaunualustaisella murskaimella terminaalissa kahdessa vuorossa toimittaessa.*

Herkkyystarkastelussa tutkitaan vuotuisen käyttömäärän ja laskentakoron eli pääoman tuottovaatimuksen muutosten vaikutusta pääoma- ja vakuutuskustannuksiin MWh:a kohden sekä vuosituotannon vaikutusta kokonaiskustannuksiin, kuvat 28 ja 19.



Kuva 28. *Pääoma- ja vakuutuskustannukset vuotuisen käyttömäärän ja pääoman tuottovaatimuksen mukaan pienpuun murskauksessa keskikokoisella, puoliperävaunualustaisella murskaimella terminaalissa. 1 vuoro = 1700 työtuntia, 2 vuoroa = 3400 työtuntia, 3 vuoroa = 5100 palkallista työtuntia vuodessa.*



Kuva 29*. Murskauksen kokonaiskustannukset vuosimäärän mukaan. Tuotos kahdessa vuorossa 210 GWh/a. Selitteessä pääoman tuottovaatimus.*

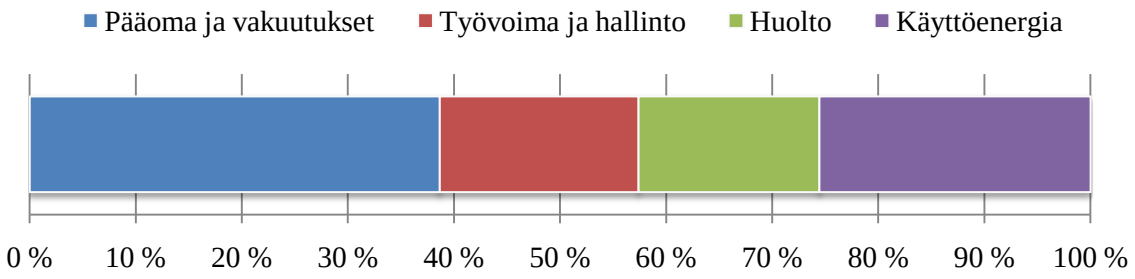
8.2.2 Suuri murskain terminaalissa

Laskennalliset murskauskustannukset on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Pienpuun murskauskustannukset suurella, puoliperävaunualustaisella murskaimella terminaalissa. Investointitukea, 20-25%, ei ole huomioitu laskelmassa.

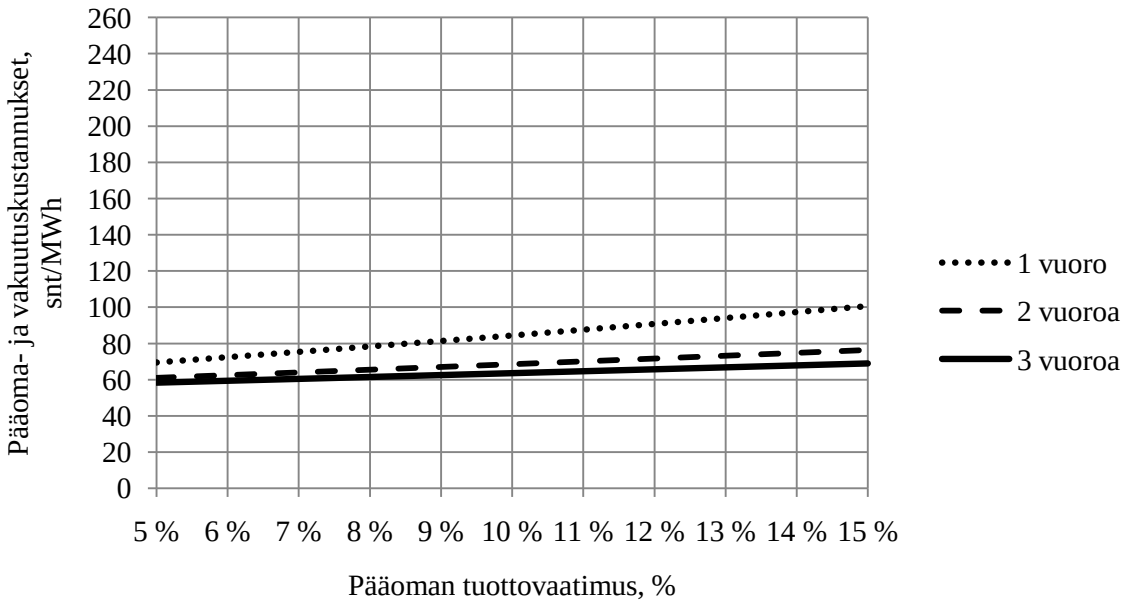
	snt/MWh	Peruste
Pääoman poisto ja korko	66	700 000 e, 4,4 vuotta, 10%, ei jäännösarvoa
Vakuutukset	2	1% investoinnista/a, 310 GWh/a
Työvoima	27	3400 h/a, 25 e/h, 310 GWh/a
Hallinto	6	4 h/leimikko, 30 e/h, 2000 MWh/varasto
Terät ja seulat	15	kokemusperäinen arvio
Muut huolto	15	kokemusperäinen arvio
Käyttöenergia	45	0,9 l/MWh, 60 snt/l, voiteluaine 8% tästä
Odottamaton	9	5%, vauriokorjaukset ym.
Murskaus yhteensä	185	

Kuvassa 30 on esitetty kustannusjakauma kustannuslajeittain.

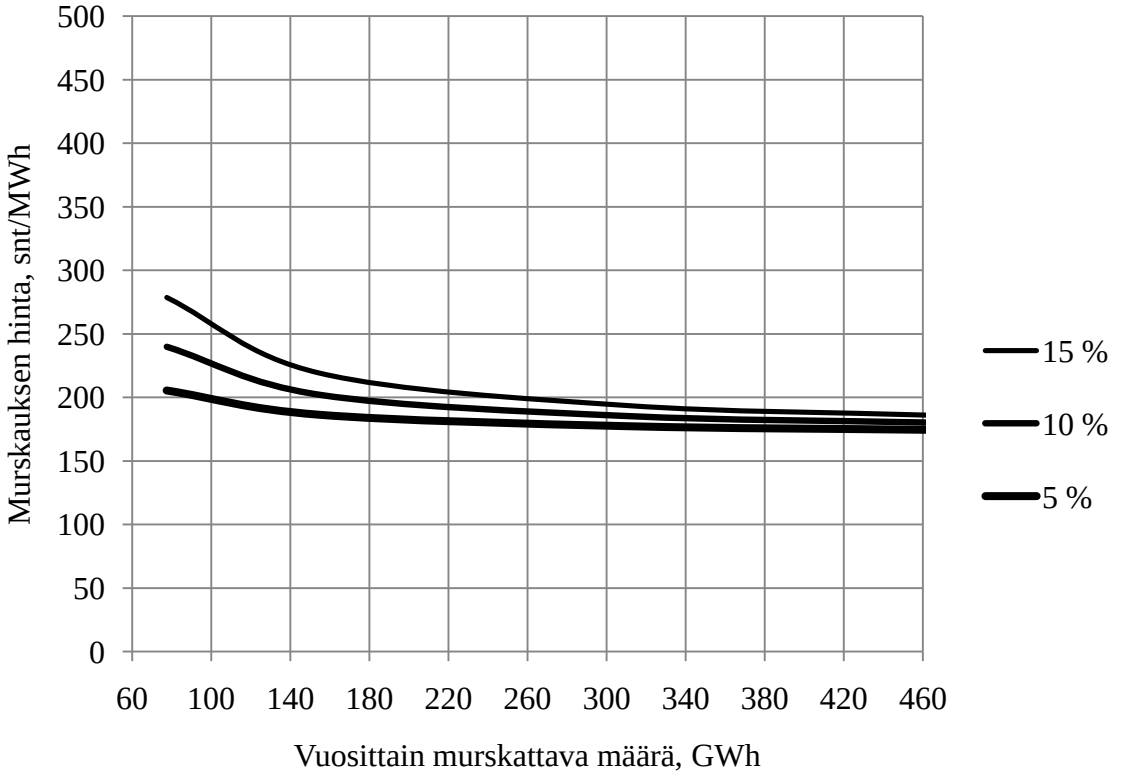


Kuva 30. *Kustannusten jakautuminen pienpuun murskauksessa suurella, puoliperävaunualustaisella murskaimella terminaalissa kahdessa vuorossa toimittaessa.*

Herkkyystarkastelussa tutkitaan vuotuisen käyttömäärän ja laskentakoron eli pääoman tuottovaatimuksen muutosten vaikutusta pääoma- ja vakuutuskustannuksiin MWh:a kohden sekä vuosituotannon vaikutusta kokonaiskustannuksiin, kuvat 31 ja 32.



Kuva 31. *Pääoma- ja vakuutuskustannukset vuotuisen käyttömäärän ja pääoman tuottovaatimuksen mukaan pienpuun murskauksessa suurella, puoliperävaunualustaisella murskaimella terminaalissa. 1 vuoro = 1700 työtuntia, 2 vuoroa = 3400 työtuntia, 3 vuoroa = 5100 palkallista työtuntia vuodessa.*



Kuva 32*. Murskauksen kokonaiskustannukset vuosimäärän mukaan. Tuotos kahdessa vuorossa 310 GWh/a. Selitteessä pääoman tuottovaatimus.*

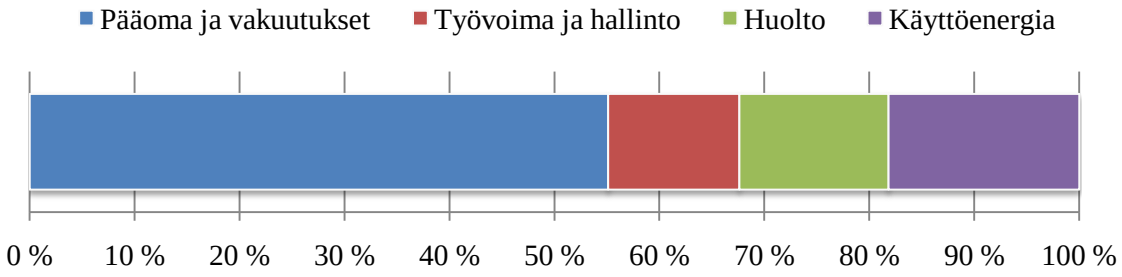
8.2.3 Keskikokoinen murskain voimalaitoksella

Laskennalliset murskauskustannukset on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Pienpuun murskauskustannukset keskikokoisella, hidaskäyntisellä, kiinteällä murskaimella voimalaitoksella. Investointitukea, 20-25%, ei ole huomioitu laskelmassa.

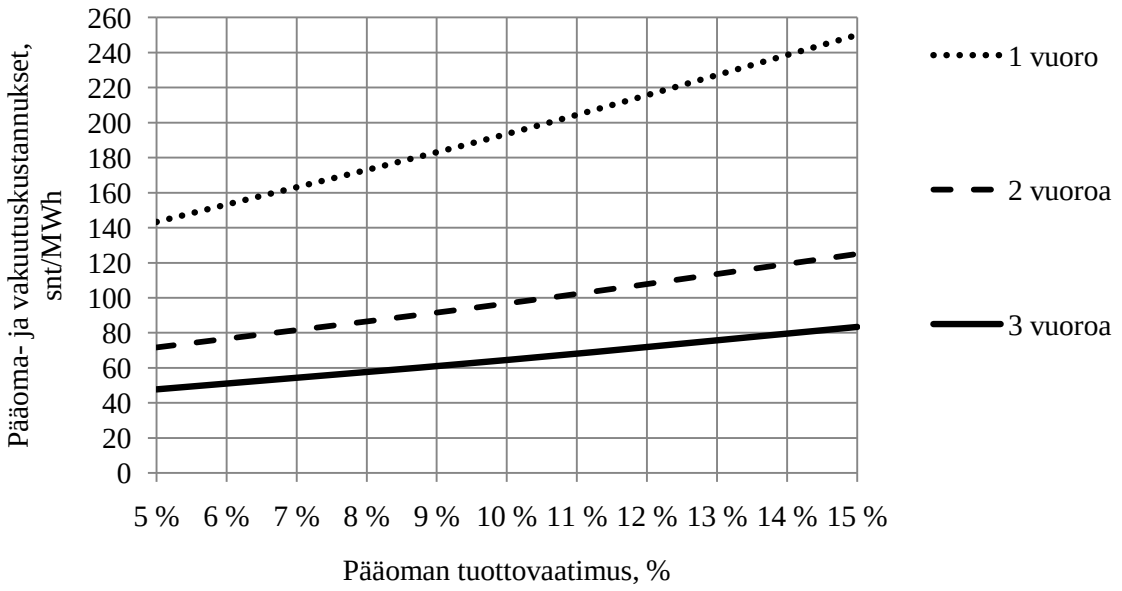
	snt/MWh	Peruste
Pääoman poisto ja korko	94	1 000 000 e, 15 vuotta, 10%, ei jäännösarvoa
Vakuutukset	3	0,4% investoinnista/a, 140 GWh/a
Työvoima	18	500 h/a (siivous ym.), 50 e/h (pyöräkuormaaja), 140 GWh/a
Hallinto	4	200 h/a, 30 e/h, 140 GWh/a
Terät ja seulat	15	kokemusperäinen arvio
Muut huolto	10	kokemusperäinen arvio
Käyttöenergia	32	3 kWh/MWh,7 snt/kWh, perusmaksu 14 000 e/a (500 kW)
Odottamaton	9	5%, vauriokorjaukset ym.
Murskaus yhteensä	185	

Kuvassa 33 on esitetty kustannusjakauma kustannuslajeittain.

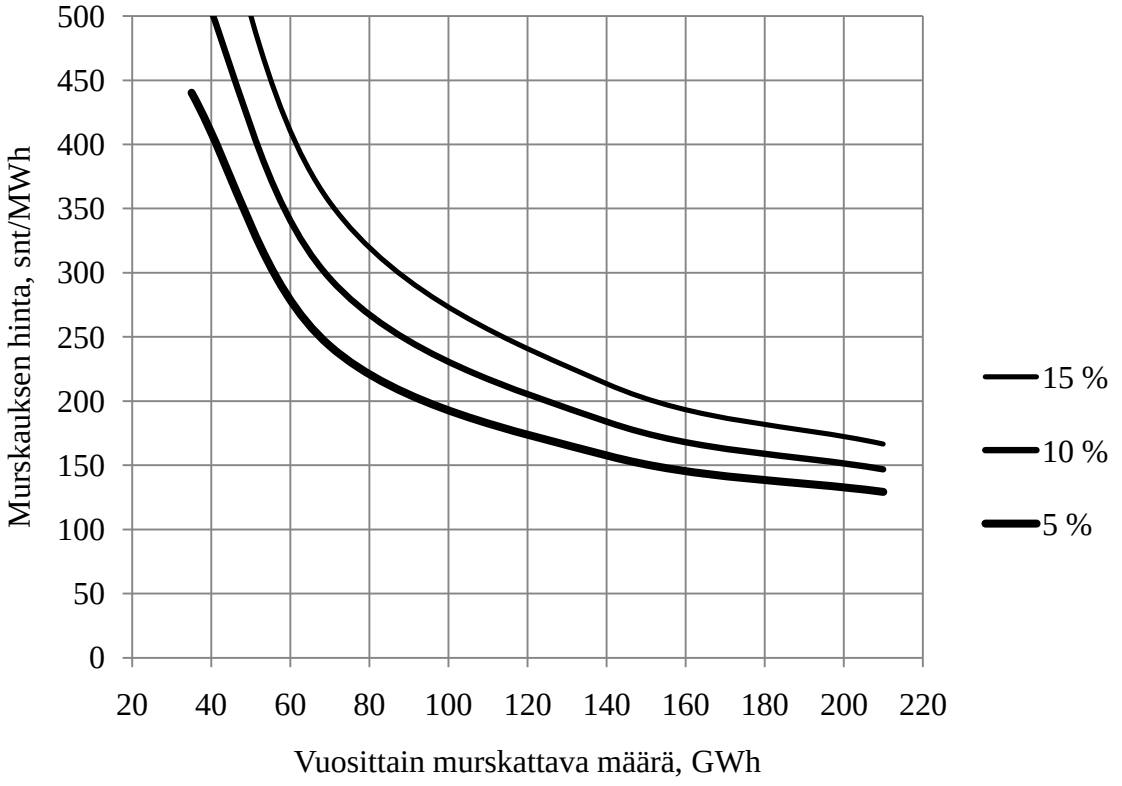


Kuva 33. *Kustannusten jakautuminen pienpuun murskauksessa keskikokoisella, kiinteällä murskaimella voimalaitoksella kahdessa vuorossa toimittaessa.*

Herkkyystarkastelussa tutkitaan vuotuisen käyttömäärän ja laskentakoron eli pääoman tuottovaatimuksen muutosten vaikutusta pääoma- ja vakuutuskustannuksiin MWh:a kohden sekä vuosituotannon vaikutusta kokonaiskustannuksiin, kuvat 34 ja 35.



Kuva 34. *Pääoma- ja vakuutuskustannukset vuotuisen käyttömäärän ja pääoman tuotto-vaatimuksen mukaan pienpuun murskauksessa keskikokoisella, kiinteällä murskaimella voimalaitoksella. 1 vuoro = 1200, 2 vuoroa = 2400, 3 vuoroa = 3600 tehollista murskaus-tuntia vuodessa.*



Kuva 35*. Murskauksen kokonaiskustannukset vuosimäärän mukaan. Tuotos kahdessa vuo-rossa 140 GWh/a. Selitteessä pääoman tuottovaatimus.*

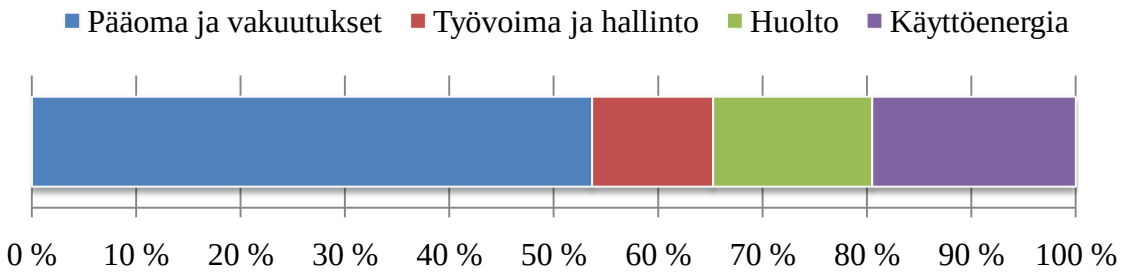
8.2.4 Suuri murskain voimalaitoksella

Laskennalliset murskauskustannukset on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Pienpuun murskauskustannukset suurella, hidas- tai nopeakäyntisellä kiinteällä murskaimella voimalaitoksella. Investointitukea, 20-25%, ei ole huomioitu laskelmassa.

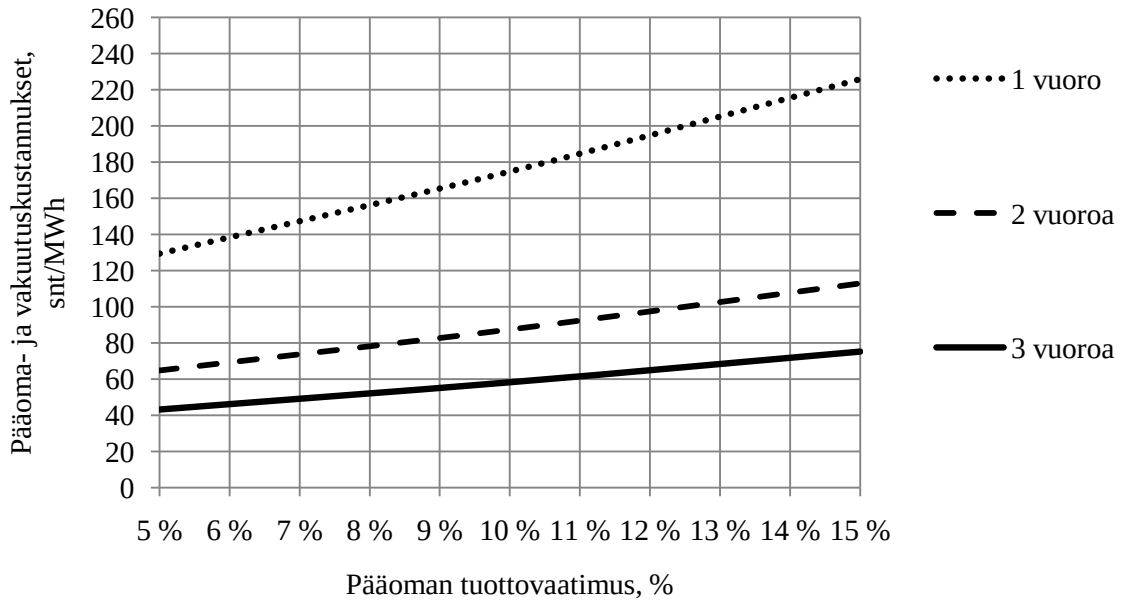
	snt/MWh	Peruste
Pääoman poisto ja korko	85	2 000 000 e, 15 vuotta, 10%, ei jäännösarvoa
Vakuutukset	3	0,4% investoinnista/a, 310 GWh/a
Työvoima	16	1000 h/a (siivous ym.), 50 e/h (pyöräkuormaaja), 310 GWh/a
Hallinto	3	300 h/a, 30 e/h, 310 GWh/a
Terät ja seulat	15	kokemusperäinen arvio
Muut huolto	10	kokemusperäinen arvio
Käyttöenergia	32	3 kWh/MWh,7 snt/kWh, perusmaksu 28 000 e/a (1000 kW)
Odottamaton	8	5%, vauriokorjaukset ym.
Murskaus yhteensä	172	

Kuvassa 36 on esitetty kustannusjakauma kustannuslajeittain.

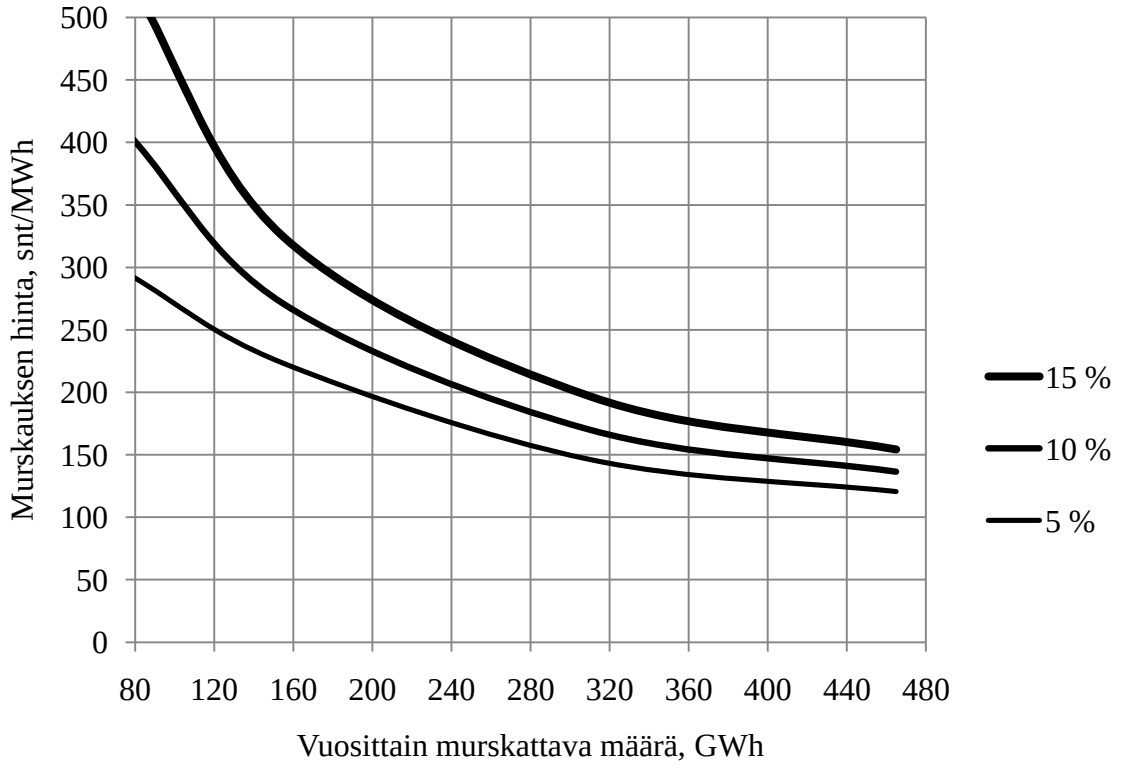


Kuva 36. *Kustannusten jakautuminen pienpuun murskauksessa suurella, kiinteällä murskaimella voimalaitoksella kahdessa vuorossa toimittaessa.*

Herkkyystarkastelussa tutkitaan vuotuisen käyttömäärän ja laskentakoron eli pääoman tuottovaatimuksen muutosten vaikutusta pääoma- ja vakuutuskustannuksiin MWh:a kohden sekä vuosituotannon vaikutusta kokonaiskustannuksiin, kuvat 37 ja 38.



Kuva 37. *Pääoma- ja vakuutuskustannukset vuotuisen käyttömäärän ja pääoman tuottovaatimuksen mukaan pienpuun murskauksessa suurella, kiinteällä murskaimella voimalaitoksella. 1 vuoro = 1700 työtuntia, 2 vuoroa = 3400 työtuntia, 3 vuoroa = 5100 työtuntia vuodessa.*



Kuva 38*. Murskauksen kokonaiskustannukset vuosimäärän mukaan. Tuotos kahdessa vuorossa 310 GWh/a. Selitteessä pääoman tuottovaatimus.*

8.3 Eri vaihtoehtojen kustannusvertailu

Taulukkoon 13 on koottu pienpuusta tehdyn polttoaineen tuotantokustannuksia. Autokuljetusten hintoja ovat esittäneet Ranta ja Rinne (2006), Rinne (2005, 12 ja 13), junakuljetusten Ranta (2010, 5) ja ketjun muita kuluja (kantohinta, hakkuu, metsäkuljetus ja organisaatio sekä terminaalissa lastaus) Korpinen ym. (2008). Haketus- ja murskaushinnat ovat tässä työssä esitettyjä, joskin esimerkiksi Korpinen ym. (2008) esittävät pienpuun välivarastohaketuksen kustannuksiksi saman 3,2 euroa/MWh, kuin tässä on laskennallisesti saatu. Kemera-, investointi- tai muita tukia ei ole laskelmassa huomioitu.

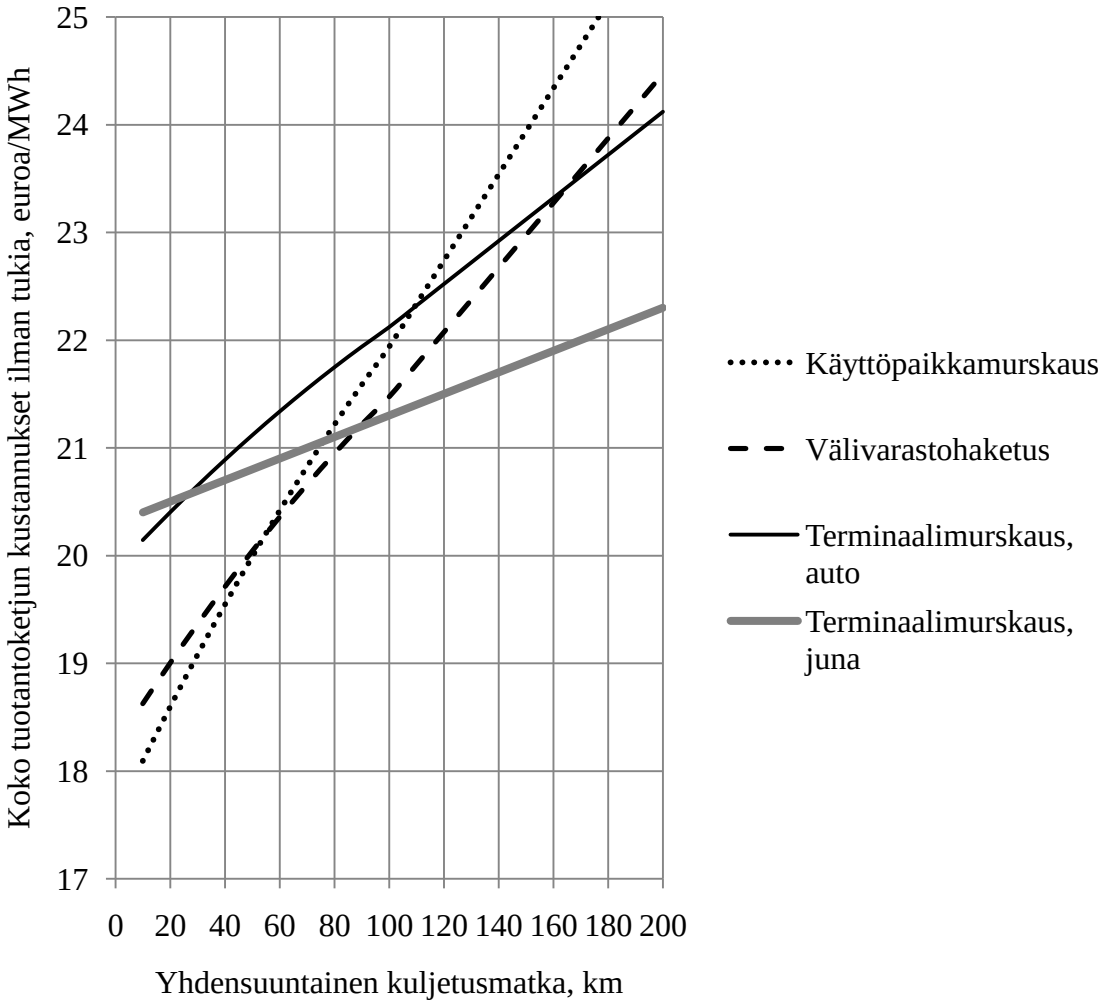
Terminaalin on oletettu olevan siirtokuormausterminaali eli sellainen, että puuta varastoidaan ainoastaan sen verran, että sitä on riittävän suuri kertaerä edullista murskausta ja toisaalta junakuljetusta varten, noin 2000 MWh. Tämä vaatii alaa noin 2000 m^2, jos murskain kulkee kahden kasan välissä ja pudottaa valmiin murskeen taakseen. Maan hinnalla 5000 euroa/hehtaari, päällystyksen hinnalla 20 e/m^2, 15 vuoden poistoajalla ja 10% rahan hinnalla kustannuksia kentästä tulee noin 5 snt/MWh, jos tavaraa kulkee vuodessa terminaalin kautta 100 GWh. Murske kuormataan autoihin tai junaan pyöräkuormaajalla, jonka kustannuksiksi on oletettu 40 euroa/tunti ja tuottavuudeksi 300 MWh/h. Tässä tehokkaasti toimivan läpivirtausterminaalin vaihtoehdossa sen kustannuksiksi tulee siis noin 0,2 euroa/MWh, mikä on laskelmassa huomioitu.

Terminaalissa voidaan myös kausivarastoida puuta. Tällöin kentän lisäkustannusten ohella on otettava huomioon puun mahdollinen kuivuminen varastoinnin aikana ja toimitusvarmuuden lisääntyminen tuottoina, mutta myös kuiva-ainetappiot ja varaston korkokustannukset kuluina.

Taulukko 13. Erilaisten pienpuun hienontamismenetelmien tyypillisiä kustannuksia ja koko pienpuun tuotantoketjujen kustannuksia kaukokuljetusmatkan mukaan, ilman tukia, senttiä/MWh (haketus ja murskaus) ja euroa/MWh (muut). Toiminta kahdessa vuorossa. Lyhenteet otsikoissa: H = hakkuri, M = murskain, Ke = keskikokoinen, S = Suuri, Vv = välivarastolla, T = terminaalissa, Vl = voimalaitoksella (tai terminaalissa).

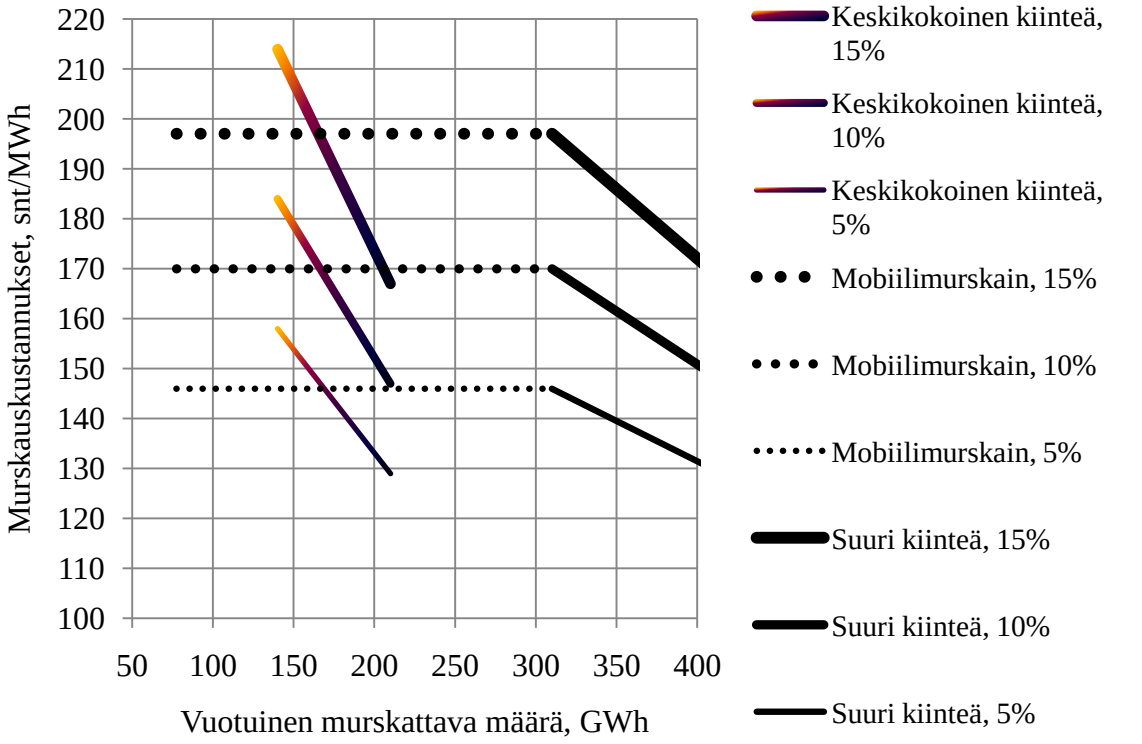
	H Ke Vv	H S Vv	M Ke T	M S T	M Ke Vl	M S Vl
Pääoman poisto ja 10% korko	102	124	75	66	94	85
Vakuutukset	4	6	3	2	3	3
Työvoima	79	71	40	27	18	16
Hallinto	18	18	6	6	4	3
Terät ja seulat	25	25	15	15	15	15
Muut huolto	15	15	15	15	10	10
Käyttöenergia	58	52	52	45	32	32
Odottamaton	15	16	10	9	9	8
Haketus/murskaus yht.	316	327	215	185	185	172
Kuljetus terminaaliin, 30 km			3,5	3,5		
Kaukokuljetus, 50 km, auto	3,1	3,0	1,8	1,8	4,6	4,6
Kaukokuljetus, 150 km, auto	6,1	6,0	3,8	3,8	8,5	8,5
Kaukokuljetus, 150 km, juna			2,5	2,5		
Ketjun muut kulut	13,7	13,7	13,9	13,9	13,7	13,7
Kaikki yhteensä, 50 km, auto	**20,0**	**20,0**	21,4	21,1	20,2	**20,0**
Kaikki yhteensä, 150 km, auto	23,0	23,0	23,4	23,1	24,1	23,9
Kaikki yhteensä, 150 km, juna			22,1	**21,8**		

Haketus ja murskaus ovat puhtaalla materiaalilla melko samanhintaisia, jos laitteet ovat muuten samankaltaisia. Toimintaympäristö vaikuttaa pienpuulla hienonnusperiaatetta enemmän kokonaiskustannuksiin ja kuten taulukosta havaitaan, selvää kustannusjohtajaa kautta linjan menetelmissä ei ole, vaan tässä yksinkertaistetussa esityksessä kuljetusmatka määrää edullisuusjärjestyksen. Kuvassa 39 on esitetty vastaavat kustannukset kuvana kaukokuljetusmatkan mukaan. Käytännössä menetelmävalinnassa on huomioitava muun muassa käytettävissä oleva kalusto ja puskurivarastoinnin tarve terminaalissa tai laitoksella.



Kuva 39. *Pienpuusta tehdyn polttoaineen tuotantoketjujen kokonaiskustannusvertailu. Toiminta kahdessa vuorossa. Hakkureiden ja murskaimien on oletettu olevan suuria vaihtoehtoja. Tämän vaikutus ei kuitenkaan ole kokonaiskustannuksissa merkittävä. Terminaalimurskausketjussa on oletettu murskaamattoman tavaran alkukuljetusmatkan olevan 30 km.*

Tässä käytetyillä lähtöarvoilla murskaus käyttöpaikalla on edullisin tuotantomenetelmä, jos kuljetusmatka on alle 50 km. Murskaus tai haketus laitoksella voidaan tehdä joko siirrettävin tai kiintein laittein. Kiinteän, järeän murskan kannattava hankinta edellyttää riittävää käyttömäärää. Kuvassa 40 on vertailtu murskauskustannuksia terminaalissa tai laitoksella mobiilimurskaimella ja kiinteällä murskaimella. Kiinteä murskain on tässä tapauksessa keskikokoinen malli 200 GWh:iin saakka, suuri siitä eteenpäin, mobiili kaikilla määrillä suuri.



Kuva 40. *Murskauskustannuksia terminaalissa tai laitoksella mobiilimurskaimella ja eri kokoisilla kiinteillä murskaimella vuosittaisen murskattavan määrän ja pääoman tuottovaatimuksen mukaan. Selitteen prosentit tarkoittavat pääoman tuottovaatimusta. Mobiilimurskaimen on ajateltu työskentelevän myös muualla, siksi vakiokustannukset määrän mukaan. Edellytyksenä kuitenkin riittävän suuri kerralla murskattava erä, noin 2 GWh.*

Kiinteät murskaimet alkavat olla kannattavia noin 170 GWh:n jälkeen keskikokoisen kiinteän murskaimen kyseessä ollen ja 310 GWh:n jälkeen suuren kiinteän murskaimen tapauksessa. Pienemmästä tosin loppuu kapasiteetti pian tämän jälkeen. Toisaalta mobiilimurskan käyttö saattaa olla rajoitettua melu- tai pölyherkillä paikoilla. Laskelmassa ei ole myöskään otettu huomioon sitä, että mobiilimurska vaatii noin 2000 MWh:n raaka-ainevaraston, siis noin 2000 m^2 tilaa laitoksen pihalla. Tämä voi olla vaikea tai kallis järjestää, mutta taas toisaalta toimii pienenä puskurivarastona, joka kiinteänkin murskan tapauksessa on hyvä olla olemassa ruuhkien, häiriöiden yms. varalta. Pienemmänkin erän murskaus mobiililla on tietenkin mahdollista, mutta tällöin yksikkökustannukset ovat suuremmat. Kiinteällä murskalla on myös huomioitava puun saatavuus läheltä, ks. luku 7.1.3. Jos alle 50 km:n päästä ei ole saatavana esimerkiksi 150 GWh:a tavaraa, ei kiinteän murskaimen hankinta vaikuta kovin hyvältä ratkaisulta. Tosin tämä on pohdittava aina tapauskohtaisesti määrät ja matkat, melu, pöly ynnä muut asiat huomioiden.

9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Energiapuu on hienonnettava kuljettimille ja kattilaan sopivaan kokoon. Tämä tehdään Suomessa yleensä joko metsätien varressa välivarastolla, keskitetyssä terminaalissa tai voimalaitoksella. Haketuspaikan valintaan vaikuttavat mm. kuljetusmatkat ja puskurivarastoinnin tarve. Terminaalin kautta toimittaessa hakettamaton puuraaka-aine viedään aluksi sellaisenaan terminaaliin. Tämä maksaa kilometriä kohden 50-100% enemmän hakkeen kuljetukseen nähden, mutta toisaalta terminaalista, haketuksen jälkeen, kuljetus on mahdollista saada edullisemmaksi kuin metsässä haketettaessa. Erityisesti junakuljetukset tarjoavat mahdollisuuksia puupolttoaineen hankkimiseksi pitkiltä etäisyyksiltä. Murskaus voimalaitoksella kiinteillä laitteilla puolestaan sopii tilanteeseen, jossa laitoksen lähellä on runsaasti energiapuuta saatavilla.

Puu hienonnetaan joko terävillä terillä hakettamalla tai tylpemmillä työkaluilla murskaamalla. Hakkeessa on vähemmän käsittelyä haittaavia pitkiä tikkuja ja sen valmistamiseen tarvittava energia on hiukan pienempi kuin murskaimilla. Viimeksi mainitulla on merkitystä lähinnä karsittua puuta haketettaessa. Murskain puolestaan sallii enemmän epäpuhtauksia raaka-aineessa, joten esimerkiksi kantoja käsitellään vain murskaimilla. Pienille laitoksille on polttoaine hyvä valmistaa hakkureilla.

Kokonaiskustannukset pienpuun haketukselle tai murskaukselle ovat välivarastolla noin 3,4 euroa/MWh ja terminaalilla tai voimalaitoksella noin 2 euroa/MWh. Pääomakustannukset ovat tässä työssä erityisesti tarkastellulla pienpuulla tavallisesti 1-1,2 euroa/MWh, keskitetyllä terminaalilla toimittaessa noin kolmanneksen vähemmän, jos pääomalle asetetaan 10% tuottovaatimus. Työvoimakustannukset ovat 30-80 snt/MWh varaston ja laitteen koosta riippuen, käyttöenergia dieselmoottoria käytettäessä noin 50 snt/MWh, sähkömoottorilla noin 30 snt/MWh. Muut kulut, mm. huolto, ovat yhteensä 40-80 snt/MWh.

Kiinteillä murskaimilla on pääomakustannusten osuus kokonaiskustannuksista (noin 50%) suurempi kuin mobiililaitteilla (noin 40%). Kiinteiden tai yleisesti ottaen järeiden laitteiden edullisuus perustuu suureen tuottavuuteen, pitkään käyttöikään, sähkökäyttöön ja joissakin tapauksissa mahdollisuuteen syöttää murskainta suoraan autosta. Riskienhallinnan kannalta mobiililaitteet ovat kuitenkin suositeltavampia, ellei riittävän suuri käsiteltävä

määrä ole tiedossa esimerkiksi kymmeneksi vuodeksi eteenpäin. Mobiilimurskaus terminaalissa suurilla varastoilla ja kiinteän laitteen käyttö ovat lähes samanhintaisia.

Nopeakäyntiset hakkurit tai murskaimet ovat tiettyä kapasiteettia kohden hankintahinnaltaan hidaskäyntisiä murskaimia edullisempia. Niiden ongelmana voivat kuitenkin olla melu ja pöly, jotka saattavat rajoittaa tai jopa estää toiminnan joillakin paikoilla. Tehokkaiden melun- ja pölyntorjuntatoimien jälkeen nopeakäyntisen murskaimen hinta saattaa olla sama kuin vastaavan hidaskäyntisen. On myös huomattava, että hidaskäyntisen toiminta on helpompi automatisoida huomattavasti suuremman syöttöaukkonsa vuoksi. Selvää, kaikkiin tapauksiin sopivaa yleistystä, kumpi näistä murskaintyypeistä on parempi, ei voida antaa.

Yleisesti ottaen kannattaa valita sitä suurempi hakkuri tai murskain, mitä keskitetymmin ja suuremmilla varastoilla toimitaan. Erot eri kokoisten laitteiden välillä kokonaiskustannuksissa eivät kuitenkaan ole suuria silloin, kun toimitaan esimerkiksi kahdessa vuorossa ja laitteet ovat lähtökohtaisestikin melko suuria, auto- tai puoliperävaunualustaisia. Varsinkin kiinteillä murskaimilla pääomakustannukset kuitenkin kasvavat yli yhdellä eurolla/MWh, jos työskennellään yhdessä vuorossa kahden sijaan. Tämä pätee erityisesti silloin, kun kiinteä murskain on sen verran järeä, että sen kestävyys sallisi suurienkin puumäärän murskaamisen ilman, että käyttöikä lyhenee esimerkiksi tässä oletetusta 15 vuodesta.

Merkittäviä kustannusten alentamisen mahdollisuuksia ei haketuksessa tai murskauksessa koko tuotantoketjun kustannuksiin suhteutettuna juurikaan ole, mikäli käsiteltävä tavara on karsittua tai karsimatonta pienpuuta ja kalusto on uutta. Konesiirtoja vähentämällä ja vuosittaista työaikaa lisäämällä, toisin sanoen toimintaa tarkemmin suunnittelemalla, voidaan kustannuksia vähentää jonkin verran, tyypillisesti korkeintaan noin 50 snt/MWh. Suurimmat kehityspotentiaalit ovat kuitenkin hankalamman tavaran, kuten kantojen, käsittelyssä. Siinä laitteen riittävä koko on myös merkittävämpi tekijä kuin pienpuulla.

Energiapuun hankinnan kokonaiskustannuksista raaka-aineen hienontamisen osuus on 10-30% puutavaran lajista ja käytetystä työmenetelmästä riippuen. Kustannuksia tarkasteltaessa on aina muistettava tarkastella koko tuotantoketjua, kuljetukset ja puskurivarastoinnin tarpeellisuus ja toteutettavuus huomioiden.

Tässä käytetyillä lähtöarvoilla murskaus käyttöpaikalla on edullisin tuotantomenetelmä, jos kuljetusmatka on alle 50 km. 50 kilometriä hieman pidemmillä matkoilla nykyinen valtamenetelmä eli haketus välivarastolla metsätien varressa on edullisin ja noin 100 kilometriä pidemmillä matkoilla puun vienti sellaisenaan terminaaliin, haketus tai murskaus siellä ja rautatiekuljetus on edullisin. Koska kuljetuskustannus junalla on edullinen, noin yhden euron/MWh/100 km, pitkätkin matkat ovat mahdollisia, jos vain tavara saadaan junaan riittävän edullisesti.

Aluskuljetus on junakuljetuksen tapaan potentiaalisesti edullisin pitkien matkojen menetelmä. Kummankin käyttöä tosin rajoittavat sopivien kuormauspaikkojen sijainnit ja myös organisointi. Satunnaisilla, hajanaisilla erillä sekä juna että alus voivat olla huomattavasti kalliimpia kuin tässä on esitetty.

Haketuksen ja murskauksen kannalta tämä merkitsee sitä, että toiminta terminaalissa on yhä tärkeämpää, sillä käyttömäärien kasvaessa korjuu joudutaan ulottamaan yhä kauempana voimalaitoksista oleville paikoille. Toisaalta haketus välivarastolla on yhä kustannusten puolesta käyttökelpoinen yleismenetelmä, ellei matka ole kovin pitkä.

Erityisesti terminaaleilla ja voimalaitoksilla, mutta myös esimerkiksi virkistysalueiden lähellä metsässä toimittaessa on kiinnitettävä huomiota melun- ja pölyntorjuntaan sekä ympäristön viihtyisyyden että työntekijöiden terveyden kannalta. Muun muassa näistä syistä saattaa kiinteä, sähkökäyttöinen murska olla sopiva sellaisiin kohteisiin, joissa käsiteltävät määrät ovat suuria, yli 200 GWh/a ja toiminta pysyvää. Melun ja pölyn kunnollinen torjunta vaatii suuria rakenteita, joita on vaikea yhdistää liikuteltaviin laitteisiin. Meluseinämin ja vesisumutuksella voidaan haittoja kuitenkin torjua melko tehokkaasti, jos toteutukset suunnitellaan huolellisesti. Myös hidaskäyntisen murskaimen käyttö nopeakäyntisen sijasta helpottaa näitä ongelmia.

LÄHTEET

Ajanko-Laurikko, S. ja Fagernäs, L. 2007. Occupational health hazard in the handling of new biofuels. Teoksessa Savolainen, M. (toim.). Bioenergy 2007, Book of Proceedings. Finbio, Jyväskylä. Sivut 415-418.

Alakangas, E., Sauranen, T. ja Vesisenaho, T. 1999.Hakkuutähteestä polttohakkeeksi - Koulutusmateriaali. VTT Energia, Jyväskylä. 82 s.

Alakangas, E. 2000. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. VTT tiedotteita 2045. 173 + 17 s. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2000/T2045.pdf

Anttila, P., Karjalainen, T. & Asikainen, A. 2009. Global potential of modern fuelwood. Metlan työraportteja 118. 29 s. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2009/mwp118.htm

Anttonen, E. Raumaster Oy. 2010. Suullinen tiedonanto.

ASAE Standards. 1994. Standards, Engineering practices, Data. American Society of Agricultural Engineers.

Asikainen, A. 2009. Metsäenergiavarat ja korjuuteknologia Suomessa ja Euroopassa. Esitys. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.biomas.fi/fi/document.cfm?doc=show&doc_id=90

Bohm, M. & Bengtsson, N. 1993. Minska maskinkostnaderna med planerat förebyggande underhåll. JTI meddelandet 442.

Brown, M. 2009. Lausunto Reutersin verkkosivulla, artikkelissa What Copenhagen Accord means for prices, markets. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.reuters.com/article/idUSLDE5BK00C20091221

Bruks, A. 1998. Suullinen tiedonanto. Bruks AB.

CEN/TS 14588. 2002. Kiinteät biopolttoaineet - Terminologia, määritelmät ja kuvaukset. 34 s.

Diesen, M. 1998. Economics of the Pulp and Paper Industry. Papermaking Science and Technology. Book 1. Paperi-Insinöörit ja TAPPI. 186 s.

Dyrke, J., Lindberg, M., Morelius, P. 1999. Problematik vid lagring och hantering av biobränslen - en förstudie. SYCON Konsult AB. Värmeforsk, anläggningsteknik. Rapport 661. 67 s. [Viitattu 7.6.2010]. http://www.varmeforsk.se/rapporter?action=show&id=1761

Elo, J. 2009. Metsäbiomassan saatavuus energiantuotantoon eri markkinatilanteissa. Loppuraportti. Pöyry Oy. 46 s. [Viitattu 7.6.2010]. http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimuk-set/liitteet/et_mets%C3%A4bioenergiaselvitysi_30042009.pdf?SectionUri=%2Ffi%2Fjulkaisut

Energia-Ekono. 1998. Metsäpolttoaineiden käytön tilannekatsaus. Loppuraportti. Bioenergian tutkimusohjelma. 26 + 5 s.

Energiateollisuus ry. Päästökauppa. [Viitattu 7.6.2010]. http://www.energia.fi/fi/ymparisto/paastokauppa

Hakkila, P. 1984. Metsähakkeen hankinta lämpölaitosten polttoaineeksi. Tutkimusraportti nro 33. Metsäntutkimuslaitos. Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto ja Suomen itsenäisyyden juhlavuoden 1967 rahasto Sitra. Helsinki. 123 s.

Energiasanasto. Tekniikan sanastokeskus, TSK 16. LVI-Kustannus Oy. 140 s.

Fredriksson, T. 2010. Energiapaketissa on paljon ilmaa. Artikkeli Bioenergia-lehdessä 3/2010. Sivut 2-3.

Föhr, J. 2010. Tienvarsihaketusketjun tutkimuksen tuloksia. Julkaisematon tutkimus.

Hakkila, P. 2003. Metsähakkeen tuotantojärjestelmät. Teoksessa Knuuttila, K. (toim.). Puuenergia. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy ja BENET Bioenergiaverkosto. 115 s.

Hakkila, P. 2004. Puuenergian teknologiaohjelma 1999-2003. Metsähakkeen tuotantoteknologia. Loppuraportti. VTT Prosessit. Teknologiaohjelmaraportti 5/2004. [Viitattu 1.6.2010]. www.tekes.fi/fi/document/43273/puuenergian_teknologiaohjelma_pdf

Hallikas, J., Tuominen, M., Virolainen, V-M., Ojala, M., Uusi-Rauva, E., Karvonen, I., Lehtinen, E., Pulkkinen, U. 2003. Riskienhallinta yhteistyöverkostossa. Metalliteollisuuden Keskusliitto. 93 s.

Hamelinck, C.N., Suurs, R.A.A., Faaij, A.P.C. 2003. International bioenergy transport costs and energy balance. Universiteit Utrecht, Copernicus Institute, Science Technology Society. 31 s. + 6 s.

Hartler, N. & Stade, Y. 1977. Chipper operation for improved quality. Svensk Papperstidning 80 (1977) 14, sivut 447-453.

Hartsough, B., Drews, E., McNeel, J., Durston, T. & Stokes, B. 1997. Comparison of mechazied systems for thinning ponderosa pine and mixed coniferous stands. Forest Products Journal, Vol. 47, No. 11/12.

Heikkilä, J., Sirén, M., Ahtikoski, A., Hynynen, J., Sauvula, T. & Lehtonen, M. 2009. Energy wood thinning as a part of stand management of Scots pine and Norway spruce. Silva Fennica 43(1). Sivut 129–146.

Hillebrand, K. 2004. Pienpuun kuivatus ja varastointi. Nuoret metsät energialähteenä -seminaari. 7 s.

IEA, International Energy Agency, 2008. Marginal emission reduction costs for the global energy system, 2050. Verkkosivu. [Viitattu 1.6.2010].
http://www.iea.org/Textbase/nptable/2008/ETP2008_f2_14.pdf

Ikäheimo, J. ja Asikainen, A. 1998. Puupolttoaineen tuotantomenetelmien tuottavuus ja kustannukset. Bioenergian tutkimusohjelman projekti 136. Loppuraportti. Joensuun yliopisto. 36 s.

Impola, R. 2002. Metsähakkeen laatukartoitus. Projektiraportti PRO21/T6505/02. VTT Prosessit, Jyväskylä. 42 s. [Viitattu 1.6.2010]. http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Puuenergia/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Julkaisut/JORY-raportit/PUUJ08.pdf

Jacobson, S., Kukkola, M. & Tveite, B. 2000. Impact of whole-tree harvesting and compensatory fertilization on growth of coniferous thinning stands. Forest Ecology and Management 2000 (129). Sivut 41-51.

Järvinen, T. ja Rinne, S. 2005. Puupolttoaineen jauhaminen vasaramurskaimella. Artikkeliesitys Bioenergia-lehteen. 7 s.

Kaipainen, H., Seppänen, V., Kallio,. M. ja Flyktman, M. 1994. Hienojakoisen polttoaineen tuottaminen hakkuutähteistä ja pneumaattinen siirto palstalta ajoneuvoon. Bioenergian tutkimusohjelma. VTT Energia, Jyväskylä.

Kaipainen, H., Seppänen, V. ja Rinne, S. 1998. Hakkuutähteiden ja kokopuiden niputus ja nippujen käsittely - 115. Teoksessa Nikku, P. (toim.). Projektikirja 1993 - 1998. Osa 1. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelma, julkaisuja 21. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. Sivut 385-394.

Kalaja, H. 1987. Rumpuhakkuri TT 54 R 12. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 268. 28 s.

Karttunen, K. 2006. Energiapuuharvennus osana metsänkasvatusta ja ilmastonmuutoksen hillitsemistä. Pro gradu -työ, Helsingin yliopisto.

Karttunen, K., Jäppinen, E., Väätäinen, K. & Ranta, T. 2008. Metsäpolttoaineiden vesitiekuljetus proomukalustolla. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, tutkimusraportti ENTE B-177. 58 s. [Viitattu 7.6.2010]. http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/ClimBus/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Julkaisut/Projektiaineistot/2008/Loppuraportti.pdf

Karttunen, K. 2010. Energiapuuta Etelä-Savosta, Energiapuuharvennus osana metsänkasvatusta. Powerpoint-esitys. [Viitattu 7.6.2010]. http://www.lut.fi/fi/mikkeli/bioenergy/projects/alive/energywoodfromsouth-savo/Documents/Energiapuuta%20Etel%C3%A4-Savosta%20Energiapuuharvennus.pdf

Kasanen, E., Lundström, T., Puttonen, V. ja Veijola, R. 1996. Rahoitusriskit yrityksissä. 253 s.

Kauppinen, V-P. 1996. Keski-Suomen puupolttoainevarat. Keski-Suomen metsäenergiaprojekti, raportti 11.11. Jyväskylä. VTT Energia. 30 + 7 s.

Koljonen, T., Forsström, J., Kekkonen, V., Koreneff, G., Ruska, M., Similä, L. 2009. Suomalaisen energiateollisuuden kilpailukyky ilmastopolitiikan muuttuessa. VTT Tiedotteita 2487. 90 s. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2487.pdf

Korpinen, O-J., Ala-Fossi, A., Vartiamäki, T., Ranta, T., Rinne, S., Hämäläinen, E. ja Laitila J. 2008. Terminaalitoimintoihin perustuvan hankintalogistiikkajärjestelmän kehittäminen. LTY, energia- ja ympäristötekniikan osasto. Bioenergiatekniikan laboratorio. Mikkeli. 143 s. Ei julkisesti saatavilla.

Kuitto, P-J. & Rajala, P. 1982. Kokopuiden välivarastohaketus ja metsähakkeen autokuljetus. Metsätehon tiedotus 372. Helsinki.

Kuitto, P-J. 1986. Välivarastohaketus ja siihen liittyvä autokuljetus. Metsätehon katsaus 14/1986. Helsinki. 25 s.

Kärhä, K. 2007. Towards more cost-efficient harvesting of energy wood and pulpwood in early thinnings. Teoksessa Savolainen, M. (toim.). Bioenergy 2007, Book of Proceedings. Finbio, Jyväskylä. Sivut 443-451.

Kärhä, K. ja Fredriksson, T. 2008. Laatuajattelua tienvarsihaketukseen. Artikkeli Bioenergia-lehdessä 4/2008. S. 6-8.

Kärhä, K. 2009. Metsähakkeen tuotantoketjut Suomessa vuonna 2008.Metsätehon tuloskalvosarja 14/2009. 33 s. [Viitattu 7.6.2010]. http://www.metsateho.fi/files/metsateho/Tuloskalvosarja/Tuloskalvosarja_2009_14_Metsahakkeen_tuotantoketjut_kk.pdf

Lahti, P. 1998. Evolution-energiapuuhakkurin käyttöselvitys - D111. Teoksessa Nikku, P. (toim.). Projektikirja 1993 - 1998. Osa 1. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelma, julkaisuja 21. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. Sivut 493 - 502.

Lahti, P. & Vesisenaho, T. 1997. Evolution-energiapuuhakkurin käyttöselvitys. Energiaselvityksen loppuraportti KTM:n energiaosastolle. Dnro 21/854/95. Kauppa- ja teollisuusministeriö. 20 s.

Laine, A. 1998. Konekustannusten alentaminen maatalouskoneiden käyttöikää pidentämällä. Työtehoseuran julkaisuja 360. Yleisjäljennös Oy, Helsinki. 82 s.

Leinonen, A. 2004. Harvesting Technology of Forest Residues for Fuel in the USA and Finland. Espoo. VTT Tiedotteita 2229. 132+10 s. [Viitattu 7.6.2010]. http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2004/T2229.pdf

Leinonen, T., Tuomala, J. ja Leinonen, A. 1998. Hakkurin syötön kehittäminen energiapuulle - 123. Teoksessa Nikku, P. (toim.). Projektikirja 1993 - 1998. Osa 1. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelma, julkaisuja 21. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy. Sivut 375-384.

McDonald, T. & Stokes, B. 1994. Harvesting costs and utilization of hardwood plantations. Teoksessa Mechanization in short rotation, Intensive culture forestry conference. Mobile. Alabama, 1.-3.3.1994. Southern forest experimental station. 8 s.

Mononen, S. 2009. Suullinen tiedonanto. Karelian Puu ja Metalli Oy.

Murto, O ja Kivimaa, E. 1948. Selluloosapuun lastutus II. Paperi ja Puu 30 (1948) 21, s. 383-393.

Niiranen, M. 1983. Kuitupuun tehdaskäsittely. Teoksessa Virkola, N-E. (toim.), Puumassan valmistus II, osa 1. Suomen paperi-insinöörien yhdistys, Teknillisten tieteiden akatemia. Turku. 1106 s.

Nordén, B. ja Andersson, G. 1997. Flisning av fyra skogsbränslesortiment - studie av Bruks 1004 CT. Skogforsk stencil 1997-04-08.

Nousiainen, I., Imponen, V., Jaatinen, E. & Korpilahti, A. 1995. Puupolttoaineiden tuotantomenetelmät. Nykytekniikka, kustannukset ja kehittämismahdollisuudet. Bioenergian tutimusohjelma, julkaisuja 5. VTT Energia, Jyväskylä. 97 s.

Nousiainen, I. 1999. Puupolttoaineiden tuotannon kehitystulosten arviointi - Hakkuutähdehakkeen tuotanto päätehakkuista. Teoksessa Metsäpolttoaineiden tuotantokustannukset. Bioenergian tutimusohjelma, julkaisuja 24. Jyväskylän Teknologiakeskus, Oy, Jyväskylä. 101 s.

Oijala, T. 1991. Osapuun autokuljetuksen ajanmenekki ja kuormien koot Pohjois-Suomessa. Tutkimusraportti. Metsäteho. 8 s.

Orjala, M., Kärki, J., Mäkipää, M., Oksa, M. Puupolttoaineen vaikutus voimalaitoksen käytettävyyteen - PUUT24. Teoksessa Alakangas, E. (toim). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. VTT Prosessit, Jyväskylä. Sivut 199 - 215.

Paappanen, T., Lindh, T., Kärki, J., Impola, R., Rinne, S., Lötjönen, T., Kirkkari, A-M., Taipale, R. ja Leino, T. 2008. Ruokohelven polttoaineketjun kehittäminen liiketoiminta-mahdollisuuksien parantamiseksi. VTT Tiedotteita 2452. Espoo. 158 + 9 s. [Viitattu 7.6.2010]. http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2452.pdf

Partanen, T. 2010. Suullinen tiedonanto. Fortum, Joensuun voimalaitos.

Puupolttoaineen laatuohje. 1998. Finbio, julkaisu 5. 33 s.

Pöyry Oy. 2009. Metsäbioenergian saatavuus energiantuotantoon eri markkinatilanteissa. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20tutkimuk-set/liitteet/et_mets%C3%A4bioenergiaselvitysi_30042009.pdf?SectionUri=%2Ffi%2Fjulkaisut

Pöyry Oy. 2010. Polttoaineiden hintataso, huhtikuu 2010. Bioenergia-lehti 3/2010. s. 38.

Ranta, T. 2002. Metsähakkeen autokuljetuksen kuljetustalouden kehittäminen. Esitys puu-energian teknologiaohjelman tutkijaseminaarissa Pietarsaaressa 10.-12.4.2002. VTT Pro-sessit. 26 s.

Ranta, T., Korpinen, O-J., Jäppinen, E. & Karttunen, K 2010. Forest biomass supply logis-tics planning for a commercial scale biorefinery. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 8 s.

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

Rautalin, A. 1987. Kotimaisten polttoaineiden turvallinen tuotanto ja käyttö. Osa 8. Käsit-telytekniikka ja laitosten suunnittelu. Espoo. VTT, Tiedotteita 770. 137 + 7 s.

Rinne, M. 2008.Efiiciency and Productivity in Roadside Chipping. Teoksessa: Savolainen, M. (toim.) Forest Bioenergy Fuel Supply Chains. Book of Proceedins. Finbio, Jyväskylä. Sivut 45-54.

Rinne, S. 2005. Puupolttoaineen hankintamenetelmien kustannustarkastelu.Projektiraportti. VTT Prosessit, Jyväskylä. 13 s. [Viitattu 7.6.2010]. http://www.sentre.fi/mp/db/file_library/x/IMG/13909/file/VTTkustannusten-raportti.doc

Rinne, S. 2006a. Haketus metsässä vai käyttöpaikalla? Teho-lehti 1/2006. Sivut 26-27.

Rinne, S. 2006b. Murskaimien melumittaukset 16.10 ja 20.10.2006. Julkaisematon raportti. VTT, Jyväskylä. 2 s.

Saalasti, T. 2008. Mill side crushing technologies. Teoksessa: Savolainen, M. (toim.) Forest Bioenergy Fuel Supply Chains. Book of Proceedins. Finbio, Jyväskylä. Sivut 87-91.

Seppänen, V. 1988. Polttohakkeen palakoko välivarastohaketuksessa. VTT TIedotteita 863. 46 + 16 s.

Seppänen, V., Kaipainen, H., Kovanen, S. ja Nikala, L. 2002. Puupolttoaineen laadun ja tuotantotehokkuuden parantaminen haketustekniikkaa kehittämällä - PUUT18. Teoksessa Alakangas, E. (toim). Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2002. VTT Prosessit, Jyväskylä. Sivut 183-197.

Sirén, M., Heikkilä, J., Hynynen, J. ja Sauvula, T. 2007. Energy wood thinning alternatives in management. Teoksessa Bioenergy 2007, Book of Proceedings. Finbio, Jyväskylä. Sivut 215-221.

Suomalainen, A. 2001. Puupolttoaineiden vaikutus voimalaitoksen käyttötalouteen. Tukimusselostus ENE3/T0078/2001. VTT Energia, Jyväskylä. 21 + 4 s. [Viitattu 7.6.2010]. http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelmaPortaali/ohjelmat/Puuenergia/fi/Dokumenttiarkisto/Viestinta_ja_aktivointi/Julkaisut/JORY-raportit/PUUJ05.pdf

Tukia, J. 1999. Suullinen tiedonanto. Teollisuusvakuutus Oy.

Tanaka, N. 2009. Transport, Energy and Environment. Where are We Going and How do We Change it?. Verkkosivu. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.iea.org/speech/2009/Tanaka/Tanaka_MEET.pdf

Tiehallinto. 2002. Meluesteen runkomateriaalin vaikutus kustannuksiin. Tietoa tiensuunnitteluun nro 60. Tiehallinto, tie- ja geotekniikka. 6 s. [Viitattu 1.6.2010]. http://alk.tiehallinto.fi/thohje/tts60.pdf

Tiihonen, I. ja Korpi, J. 2003. Kaksivaiheisen murskaimen jatkokehitys puun energiajakeen tuottamiseksi - PUUY31. Teoksessa Alakangas, E. ja Holviala, N. (toim.) Puuenergian teknologiaohjelman vuosikirja 2003. VTT Prosessit. Jyväskylä. Sivut 95-103.

Vattenfall. 2008. The Climate Threat. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.webcitation.org/query?url=http://www.vattenfall.com/www/ccc/ccc/Gemeinsame_Inhalte/DOCUMENT/567263vattenfall/P0273929.pdf&date=2008-10-30

Vehmas, T., Hakala, T. & Ritala, P. 1983. Hakkuutähdehakkeen korjuutekniikka ja ominaisuudet. Tutkimusraportti nro 23. Konsulttitoimisto Aalto & Ritala Oy. Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto ja Suomen itsenäisyyden juhlavuoden 1967 rahasto Sitra. Helsinki. 105 s.

von Arnold, K. 2006. Suullinen tiedonanto. Skogsstyrelsen.

VTT. 2008. Teknologiapolut 2050 - Teknologian mahdollisuudet kasvihuonekaasupäästöjen syvien rajoittamistavoitteiden saavuttamiseksi Suomessa. VTT tiedotteita 2432. 222 s. [Viitattu 1.6.2010]. http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2008/T2432.pdf

Ylitalo, E. 2010. Metsähaketta käytettiin yli 6 miljoonaa kuutiometriä 2009. Artikkeli Bioenergia-lehdessä 3/2010. Sivut 8-9.

Äijälä, O., Kuusinen, M. & Koistinen, A. 2010. Hyvän metsänhoidon suositukset energiapuun korjuuseen ja kasvatukseen. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion julkaisuja.

SANASTO

Ainespuu

Teollisuuden minimimitat ja -laadut täyttävä puu, joka käytetään muiden tuotteiden kuin energian valmistamiseen.

Biopolttoaine

Polttoaineena käytettävä biomassa, olomuodosta riippumatta

Energiapuu

Polttoon tai muuhun energiakäyttöön tarkoitettu puu tai puutavara muodosta ja lajista riippumatta

Hake

Tietynkokoisiksi palasiksi haketettu puubiomassa, joka on valmistettu mekaanisesti teräville työkaluilla. Puuhakkeen palat ovat suorakaiteen muotoisia, tyypillinen pituus on 5-50 mm. Myös murskaimella tehtyä melko vastaavantyyppistä tuotetta, mursketta, kutsutaan usein hakkeeksi yksinkertaisuuden vuoksi.

Hakkuri

Laite, jolla valmistetaan haketta.

Hakkuu

Puun kaato ja valmistus puutavaralajeiksi.

Hakkuukone

Puunkorjuukone, jolla suoritetaan useampia kuin yksi puutavaran tekoon kuuluva työvaihe (kaato, katkonta, mittaus ja kasaus)

Hienoaines

Hienoaines on palamaisen polttoaineen joukossa olevaa tuotanto- ja käsittelyvaiheessa syntynyttä ainesta, jonka osuus määritetään seulomalla. Hienoainesta voi olla 3, 6 tai 7 mm reikäseulan läpäissyt aines.

Irtokuutiometri

Hakekuutiometri, hakeirtokuutiometri, i-m^3, hakeirto-m^3. Yksi i-m^3 = noin 0,4 m^3 (kiinto-kuutiometriä) = noin 0,8 MWh.

Kantohinta

Pystykaupoissa maksettu puun yksikköhinta, joka ei sisällä korjuu- ja kuljetuskustannuksia

Kaukokuljetus

Välivarastolta käyttöpaikalle suoritettava hakkeen kuljetus, yleensä autolla, mutta myös junaa tai alusta voidaan käyttää

Kehystilavuus

Pinon tai kasan kokonaistilavuus ulkomittojen mukaan laskettuna. Kuormatiloista puhuttaessa lasketaan sisämittojen mukaan.

Kiintokuutiometri (m^3)

Sellainen määrä puuta, joka syrjäyttää kuutiometrin vettä upotettaessa. Tässä esityksessä m^3:t tarkoittavat aina kiintokuutiometrejä, ellei toisin mainita. Yksi m^3 = noin 2,5 hakeirto-m^3 = noin 2 MWh.

Kokopuu

Karsimaton runko tai siitä tehty puutavara

Kokopuuhake

Puun koko maanpäällisestä biomassasta (runkopuu, oksat ja neulaset tai lehdet) tehty hake

Kosteus (paino-%)

Polttoaineen vesipitoisuuden suhde alkuperäisen näytteen massaan (kosteana punnittuun)

$M_s=((m_1-m_2)/m_1)*100$, jossa

m_s=märkäpainoa kohti laskettu kosteus saapumistilassa(%)

m_1=märän näytteen massa (g)

m_2=kuivatun näytteen massa (g)

Kuitupuu

Massan valmistuksen mitta- ja laatuvaatimukset täyttävä puu. Ei yleensä kelpaa sahattavaksi.

Kuormatraktori

Puunkorjuukone, jolla puutavara kuljetetaan kuormatilassa palstalta kuljetusväylän, yleensä autotien varteen. Kuorma on itse peruskoneen päällä, ei perävaunussa, siitä nimitys.

Käyttöaika/-tunti

Työmaalla työn varsinaiseen tekemiseen kuluva aika (=tehoaika) + alle 15 minuutin pituiset keskeytykset

Leijukerros

Raskaiden epäorgaanisten hiukkasten muodostama kerros, joka saadaan liikkeeseen ja irti tulipesän pohjasta ilmavirralla

Leijukerrospoltto

Poltto, jossa polttoaine syötetään leijukerrokseen, jossa se kuivuu, kaasuuntuu ja palaa

Leimikko

Korjuuta varten rajattu tai eri tavoin merkitty alue tai puusto

Lämmitysvoimalaitos

Voimalaitos, jota käytetään sekä sähkö- että lämpöenergian tuotantoon

Lämpökeskus

Energiantuotantolaitos, joka tuottaa yksinomaan lämpöenergiaa

Metsähake

Yleisnimitys metsistä korjattavasta puuraaka-aineesta tehdylle hakkeelle

Metsäkuljetus, lähikuljetus

Puutavaran kuljetus metsästä kaukokuljetusväylän, yleensä autotien varteen.

Metsätähde

Hakkuun, taimikonhoidon ym. metsänhoidon ja luontaisen kuolemisen, vioittumisen yms. seurauksena metsään jäävä puu.

Metsätähdehake

Ainespuun korjuun jälkeen oksista ja latvuksista viheraineineen tai ilman tehty hake

Murske

Polttopuuta, jolla on vaihteleva palakoko ja -muoto ja joka on valmistettu siten, että puu murskataan tylpillä työkaluilla, kuten teloilla tai vasaroilla.

Murskain

Laite, jolla valmistetaan mursketta

Oksa- ja latvusmassa

Ainespuun hakkuussa metsään jäävä osa runkopuusta, esim. oksat, latvat ja vialliset puunosat. Kutsutaan myös hakkuutähteeksi.

Palakoko

Palamaiselle polttoaineelle ominaisen palan koko. Keskimääräinen palakoko on eri kokoluokkien massaosuuksilla painotettu keskiarvo.

Palakokojakauma

Eri palakokojen/raekokojen osuudet kiinteässä polttoaineessa.

Palsta

Leimikosta työntekijää, konetta tai työryhmää varten rajattu alue

Polttohake

Yleisnimitys polttoon käytettävästä, eri tekniikoilla tehdylle hakkeelle tai murskeelle

Polttopuu

Yleisnimitys kaikelle puupolttoaineelle puu-, kuori- ja viheraines mukaan lukien. Energiatilastoissa polttopuu-nimitystä käytetään vain koti- ja maatalouden puupolttoaineille (halot ja hake).

Puuperäiset polttoaineet

Yleisnimitys kaikille puu- ja kuoriaineksesta peräisin oleville polttoaineille sisältäen myös metsäteollisuuden puutähteet ja mustalipeän.

Päästökauppa

Päästöjenrajoittamismekanismi, jossa hiilidioksidipäästöjen tuottajat ostavat päästökiintiönsä ylittävältä osalta päästöluvat markkinoilta ja vastaavasti myyvät oikeuksiaan, jos alittavat kiintiönsä. Käytössä toistaiseksi laajemmassa mittakaavassa vain EU:ssa.

Päätehakkuu

Metsikön kaikkien hakkuukelpoisten puiden poistaminen, esim. uudistushakkuiden viimeinen hakkuu

Ranka

Karsittu runko ja pölkky, joka ei yleensä täytä ainespuulle asetettuja vaatimuksia. Termiä käytetään ensisijaisesti pienikokoisesta puusta.

Rankahake

Karsitusta runkopuusta tehty hake

Tehoaika/-tunti

Työmaalla varsinaisesti työn tekemiseen kuluva aika ilman keskeytyksiä

Tiiviys

Kiintotilavuuden suhde irtotilavuuteen, m^3/i-m^3

Uudistushakkuu

Vanhan puusukupolven poistaminen yhdessä tai useammassa hakkuussa uuden puusukupolven luontaista tai viljellen (istuttaen tai kylväen) uudistamista varten

Voimalaitos

Energiantuotantolaitos, jossa tuotetaan sähköenergiaa. Sähköntuotannon jätelämpöä voidaan käyttää kaukolämmön tai teollisuuslämmön tuottamiseen (vastapainevoimalaitos) tai ajaa lauhuduttimen kautta vesistöön tai ilmaan (lauhdevoimalaitos).

Lähteinä sanastolle ovat Alakangas ym. (1999, 77-80), CEN (2002), Energiasanasto (1989) ja Puupolttoaineen laatuohje (1998, 9-10). Osa sanastosta on suoria lainauksia lähdeteoksista.