

# **Käyttöpaikallahaketuksen perustuva puupolttoaineen tuotanto**

**Antti Korpilahti  
Sakari Suuriniemi**

**Metsätehon raportti 122  
27.8.2001**

# **Käyttöpaikallahakemukseen perustuva puupolttoaineen tuotanto**

**Antti Korpilahti  
Sakari Suuriniemi**

Metsätehon raportti 122  
27.8.2001

Konsortiohanke: A. Ahlström Oy, Fortum Power and Heat Oy,  
Metsähallitus, Metsäliitto Osuuskunta, Stora Enso  
Oyj, UPM-Kymmene Oyj, Vapo Oy

Asiasanat: bioenergia, puupolttoaine, hakkuutähde, käyttö-  
paikallahakemus

© Metsäteho Oy

Helsinki 2001

## SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ .....	4
Tavoite ja perusteet.....	4
Päätulokset.....	4
1 JOHDANTO .....	9
2 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS JA AINEISTOT .....	11
2.1 Käyttöpaikallahaketusketjut.....	11
2.1.1 Hakkuutähteen paalaukseen perustuva ketju.....	11
2.1.2 Irtonaisen hakkuutähteen kuljetukseen perustuva ketju .....	17
2.1.3 Hakkuutähdepaalien murskaus- ja haketusaseman kapasiteetti ja kustannusarvio .....	19
2.2 Tienvarsi- ja palstahaketusketjut.....	19
2.3 Vertailulaskelmat .....	19
3 TULOKSET .....	20
3.1 Kosteus, tilavuuspaino ja energiasisältö .....	20
3.2 Hakkuutähteen paalaus ja kuljetus.....	24
3.2.1 Hakkuutähteen paalaus .....	24
3.2.2 Paalien metsäkuljetus .....	28
3.2.3 Paalien kaukokuljetus .....	30
3.3 Irtonaisen hakkuutähteen metsä- ja kaukokuljetus .....	31
3.3.1 Hakkuutähteen metsäkuljetus .....	31
3.3.2 Hakkuutähteen kaukokuljetus.....	34
3.4 Haketus ja murskaus käyttöpaikalla.....	35
3.5 Tienvarsihaketukseen perustuva tuotanto .....	36
3.6 Palstahaketukseen perustuva tuotanto.....	37
3.7 Palakokojakaumat .....	38
3.8 Tuotantoketjujen vertailu .....	40
3.8.1 Kustannukset ja suoritteet.....	40
3.8.2 Tuotantoketjujen päästöt.....	44
4 TULOSTEN ARVIOINTI JA JATKOTUTKIMUSTEN TARVE .....	45

# TIIVISTELMÄ

## Tavoite ja perusteet

Tavoitteena oli tarkastella hakkuutähteen kuljetukseen ja vasta käyttöpaikalla tehtävään haketukseen tai murskaukseen perustuvaa polttohakkeen tuotantotekniikkaa ja -kustannuksia. Sen kilpailukykyä verrattiin palstalla tai välivarastolla tehtävään haketukseen perustuviin ketjuihin.

Työssä tutkittiin sekä hakkuutähteen paalaukseen että irtonaisten hakkuutähteen kuljetukseen perustuvia käyttöpaikalla haketuksen ketjuja. Tuottavuustutkimuksia tehtiin Fiberpac 370 -oksapaalaimesta, paalien kuljetuksesta ja murskauksesta.

Murskauksessa kokeiltiin vasara- ja roottorimurskaimia sekä rumpuhakkureita. Murskaimet olivat järeitä, lavettialustaisia laitteita, ja hakkurit olivat kuorma-autoalustaisia. Myös irtonaisen hakkuutähteen metsä- ja kaukokuljetuksesta tehtiin tuottavuustutkimuksia. Kuljetuskalusto oli irtonaisten tähteen kuljetukseen varustettua.

Välivarastohaketukseen perustuvan ketjun tarkastelu perustettiin TT 910 Evolution -hakkurista aiemmin julkaistuihin tietoihin. Palstahaketuksen tuottavuutta tutkittiin kahdella koneella, jotka oli varustettu Bruks 803 -hakkurilla ja hakekontilla. Hakkurilla oli oma käyttömoottori.

Tuottavuustutkimusten yhteydessä hakkeista ja murskeista määritettiin kosteudet ja tilavuuspainot. Niiden ja kuormien punnitustietojen perusteella voitiin laskea hakkuutähteen ja murskeiden kiintotilavuudet aiempaa tarkemmin. Laskelmat tehtiin ensin kiintokuutiopohjaisina, ja muunnoksissa irtokuutioiksi ja megawattitunneiksi käytettiin tutkimuksessa saatuja tuloksia.

Tuotantoketjujen energiankulutus ja päästöt laskettiin polttoaineenkulutuksen ja tuottavuuden mukaan. Laskelmiin sisällytettiin mm. koneiden siirrot työmaalta toiselle ja kuljettajien henkilöautojen käyttö työmatkoilla. Niissä sovellettiin puunhankinnan päästölaskennan perusteita.

## Päätulokset

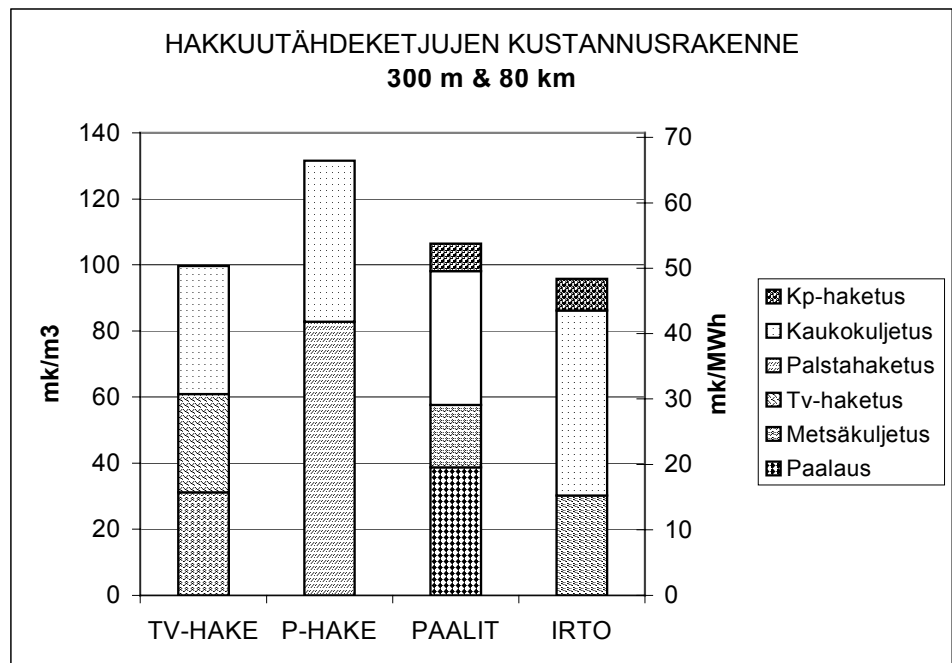
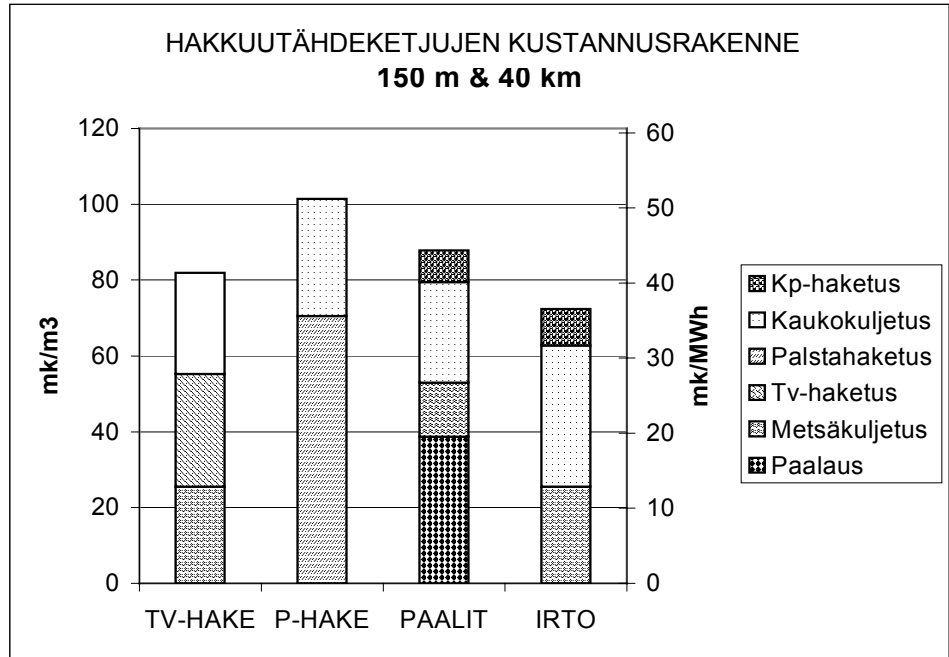
Irtonaisten hakkutähteen kuljettamiseen ja vasta käyttöpaikalla tehtävään murskaukseen perustuva tuotantoketju osoittautui edullisimmaksi (kuva A). Sillä on edelleen huomattava kehityspotentiaali autokuljetuksessa, sillä käytössä on vasta ensimmäinen hakkutähteen kuljetukseen varusteltu auto. Kuorman kokoa tulisi suurentaa ja se voidaan tehdä lähinnä kuorman tiivistämisen kautta.

Tienvarsihaketukseen perustuva tuotanto oli tässä tarkastelussa toiseksi edullisinta. Ero irtonaisen tähteen kuljetukseen perustuvaan ketjuun oli vain 4 %, kun kuljetusmatka oli 80 km. Käytännössä kuljetusmatkan vaihtelut ja eri syistä johtuvat keskeytykset lisäävät haketuksen ja kulje

tuksen odotusaikoja ja suurentavat tuotantokustannuksia. Toisaalta uusimmat välivarastohakkurit ovat tehokkaampia kuin se, mihinkä tämä tarkastelu perustui, ja välivarastohaketuksessa voidaan päästä tässä esitettyä edullisempiin tuloksiin.

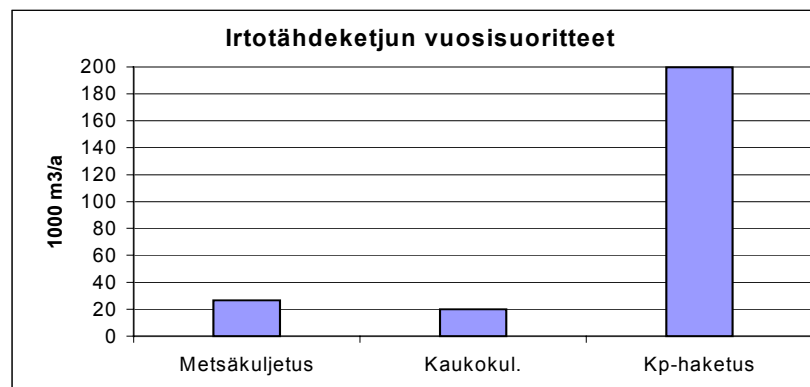
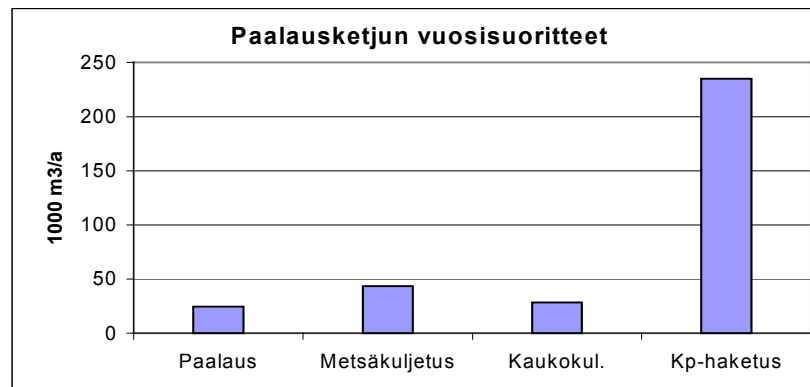
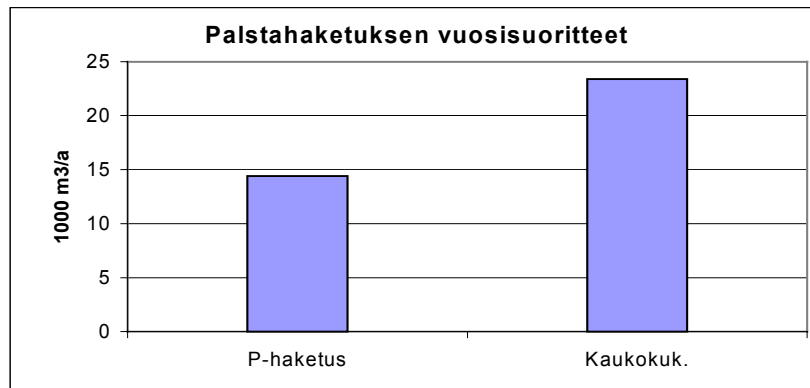
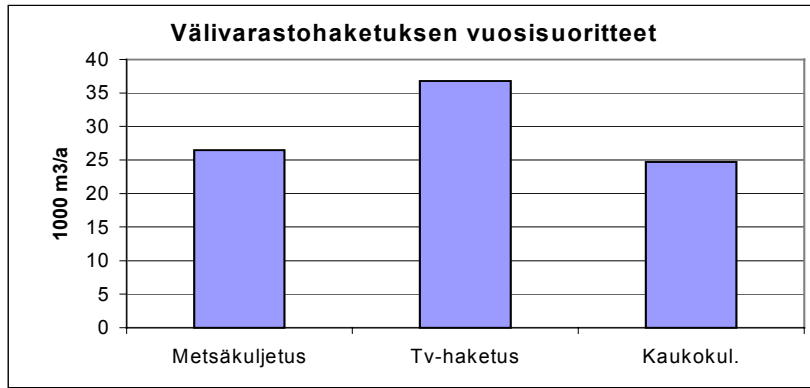
Paalaukseen perustuva tuotanto oli 10 - 20 % kalliimpaa kuin irtonaisen hakkuutähteen käyttöpaikallahaketukseen perustuva tuotanto. Paalausketjun kalleus johtui ennen muuta paalausvaiheen kalleudesta. Ketjun kilpailukyky on pitkällä kuljetusmatkoilla parempi kuin lyhyillä matkoilla. Paalit olivat noin 70 cm paksuja ja niiden tavoitepituus oli 320 cm. Kun paalin tiiviys on noin 45 % (kiintotilavuusprosentti), niin se painaa 50 %:n kosteudessa noin 480 kg ja sen kiintotilavuus on 0,55 m<sup>3</sup>.

Palstahaketukseen perustuva hakkeentuotanto oli irtotähdeketjua lähes 40 % kalliimpaa. Palstahakeskus oli hakkurin tehottoman syötön vuoksi hidasta ja kallista.



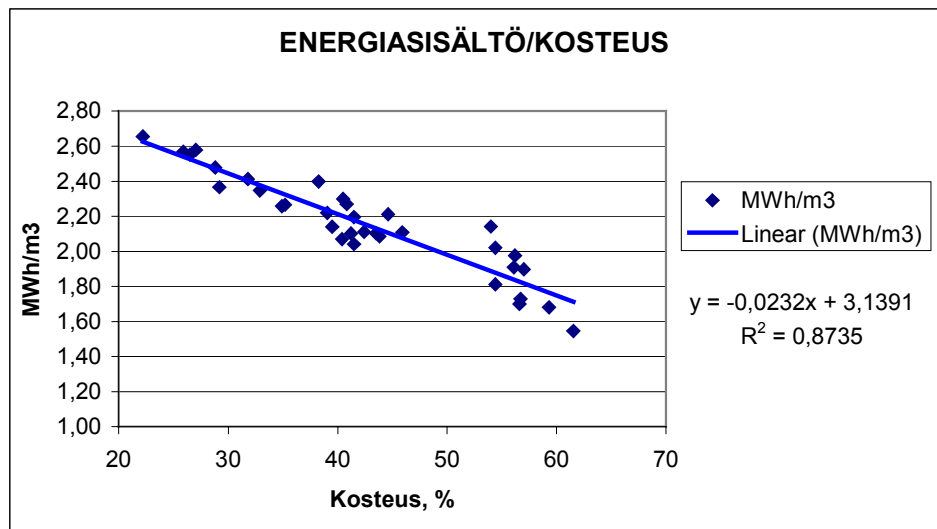
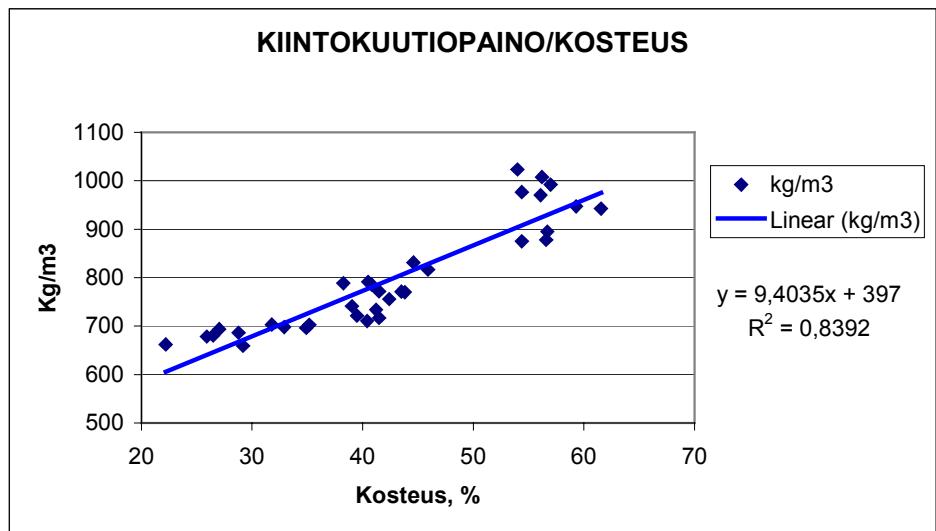
**Kuva A.** Hakkuutähdehakkeen ja -murskeen tuotantokustannukset eri tuotantoketjuilla, kun metsäkuljetusmatka on 150 m ja kaukokuljetusmatka 40 km sekä vastaavasti 300 m ja 80 km.

Tuotantoyksiköiden vuosisuoritteet voivat poiketa toisistaan huomattavastikin (kuva B). Se aiheuttaa ongelmia ennen muuta toisistaan riippuvissa tuotantovaiheissa, kuten välivarastolla haketuksessa ja siihen liittyvässä kaukokuljetuksessa. Palstahaketuksessa haketuksen ja kaukokuljetuksen kytkentä on edellistä joustavampi. Muilta osin tuotantoketjujen eri vaiheet voidaan tehdä vapaammin ajoitettuina.



**Kuva B.** Hakkuutähdehakkeen tuotantoyksiköiden vuosisuoritteet, kun metsäkuljetusmatka on 300 m ja kaukokuljetusmatka 80 km.

Tutkimuksessa saatujen kosteus- ja tilavuuspainotietojen perusteella laadittiin yhtälöt kuutiopainon ja energiasisällön määrittämiseksi kosteuden suhteen (kuva C). Yhtälöillä voidaan muuntaa hakkuutähteen tai hakkeen ja murskeen massa kiintokuutioiksi, kun materiaalin kosteus on määritetty. Kiintokuutiot voidaan edelleen muuntaa energiamääräksi. Yhtälöt antavat 50 %:n kosteudella hakkuutähteen tai murskeen kuutiopainoksi 867 kg ja energiasisällöksi 1,98 MWh/m<sup>3</sup>.



**Kuva C.** Hakkuutähteestä tuottavuustutkimusten yhteydessä otetuista näytteistä määritetyt tilavuuspainot ja energiasisällöt.



# 1 JOHDANTO

Bioenergian tutkimusohjelman (1993 - 1998) projekteissa tutkittiin ja julkaistiin tuloksia käytössä olevista palsta- ja välivarastollahaketuksen perustuvista tuotantoketjuista. Eräissä ruotsalaisissa tutkimuksissa 1990-luvun alkupuolella käyttöpaikallahaketus esitettiin erittäin kilpailukykyiseksi menetelmäksi. Myös suomalaiset arviot ja laskelmat osoittivat käyttöpaikallahaketuksessa päästävän sekä kustannuskilpailukykyiseen puupolttoaineen tuotantoon että saavutettavan logistisia etuja muihin polttoaineen tuotantotapoihin nähden. Käyttöpaikallahaketuksen perustuva tuotanto sopii hyvin suurkanäyttöön, jollaisia hankkeita on nyt maassamme vireillä useita.

Kun hakkuutähteet haketetaan vasta käyttöpaikalla, tuotantoketjut voidaan järjestää siten, että päästään eroon ns. kuumen ketjun ongelmista. Sen ansiosta tuotantoketjun kukin vaihe voidaan periaatteessa tehdä niin tehokkaasti kuin kyseessä olevalla kalustolla vain on mahdollista. Muita tuotantoteknisiä etuja esimerkiksi välivarasto- ja palstahaketuksen nähden ovat mm. haketuksessa tai murskauksessa saavutettava suuri tuottavuus ja vuosituotos ja siten myös edullisemmat tuotantokustannukset. Ruotsissa 1990-luvun lopulla kehitetyt hakkuutähteiden paalaustekniikat antavat käyttöpaikallahaketuksen perustuvalla tuotannolla aiempaa paremman tuotantoteknisen perustan ja mahdollisuuksia tuotteen laadun hallintaan. Näillä uusilla tekniikoilla hakkuutähteet paalataan pöllimäisiksi paaleiksi. Niiden käsittely ja kuljetus hoituu tavanomaisella puutavarakalustolla. Murskaus tai haketus edellyttää järeitä laitteita.

Suomeen saatiin ensimmäinen oksapaalain, ruotsalainen Fiberpac 370, vuoden 2000 alussa. Yksikkö toimii Pohjanmaalla Pietarsaaren ympäristössä. Kyseinen paalain on vielä pilotkone ja se on asennettu vanhan hakkuukoneen alustalle. Paalaustekniikkaan on suurta kiinnostusta ja myös Suomessa ideoituja tekniikoita on valmistumassa prototyypeiksi. Tässä raportissa paalaustekniikkaa on tarkasteltu pääosin edellä mainitun Fiberpac -paalainta koskevien tuottavuus- ja seurantatutkimusten tulosten perusteella.

Esimerkkinä hakkuutähdepolttoaineen suurkanäytöstä voidaan esittää mm. UPM-Kymmene Oyj:n Pietarsaaren tehdasalueelle rakennettava Oy Alholmens Kraft Ab:n voimalaitos. Sen polttoaineteho on 580 MW ja vuotuinen polttoainetarve on 3 500 GWh. Laitoksen polttoaineesta noin 40 % tulee tehdasalueella sijaitsevilta kuitupuukuorimolta ja sahalta sekä lähiseudun sahoilta. Hakkuutähdepolttoaineen osuudeksi laitoksen käynnistyessä on laskettu noin 10 %. Se merkitsee noin 200 000 m<sup>3</sup>:n eli 500 000 i-m<sup>3</sup>:n haketoimitusta vuodessa. Hakkuutähdepolttoaineen tuotannon on arvioitu työllistävän 5 - 7 oksapaalainta. Hakkuutähdepolttoainetta tuotetaan laitokselle muillakin menetelmillä.

Tutkimuksen tavoitteena oli valottaa suurkanäyttöön liittyen hakkuutähteiden käyttöpaikallahaketuksen tai -murskauksen perustuvaa metsäpolttoaineen tuotantotekniikkaa ja -kustannuksia. Sen kilpailukykyä käytössä oleviin

tuotantoketjuihin, palsta- ja välivarastohaketukseen, arvioitiin tuotanto-kustannuslaskelmien perusteella.

Työ painotettiin teknistaloudellisiin selvityksiin. Seikkaperäiset laatuun liittyvät varastointi- ym. tutkimukset jäävät muissa yhteyksissä tehtäviksi. Käyttöpaikallahaketuksessa tarkasteltiin sekä hakkuutähteiden paalaukseen että irtonaisten hakuutähteiden kuljetukseen perustuvia tuotantoketjuja.

Tarkastellut tuotantoketjut ovat:

- käyttöpaikallahaketus
  - hakkuutähdepaalaus
  - irtohakkuutähde
- palstahaketus
- välivarastohaketus autohakkurilla
- palstahakkuri välivarastolla

Projekti käynnistyi keväällä 1999. Viimeiset haketus- ja murskaustutkimukset tehtiin joulukuussa 2000 ja paalauksen tuottavuutta mitattiin pistokokeen luonteisesti vielä vuoden 2001 alussa. Tarkasteluissa hyödynnettiin soveltuvin osin aiempia tutkimus- ja muita tietoja, mutta varsinkin paalaus- ja irtotähdeketjujen tuottavuuksien selvittäminen edellytti kelloaikatutkimuksia. Palstahaketuksesta Bruks-hakkurikalustolla tehtiin tuottavuustutkimuksia, koska tästä yleisimmästä palstahakkurityypistä ei ollut aiempia tietoja. Tuottavuustutkimuksiin liittyen määritettiin laboratoriotyönä hakkeen ja murskeen kosteuksia ja tuoretilavuuspainoja sekä tehtiin palakokoseulontoja.

Lähde- ja viiteaineistoja olivat bioenergian tutkimusohjelmassa julkaistut tulokset, SkogForskin julkaisemat ja erikseen käyttöön saadut ruotsalaiset tutkimustulokset sekä Metsätehon tuottamat puunkorjuun, -kuljetuksen ja puupolttoaineen tuotannon aineistot ja tulokset. Kuljetuskalustoa, erityisesti hakkuutähdeautoa, koskevia kustannusperusteita tarkennettiin valmistajien kanssa. Myös käyttöpaikallahaketuksen ja murskauksen laitteistojen tuottavuus- ja kustannusperusteita selvitettiin valmistajien kanssa.

Tutkimukseen osallistuivat seuraavat yritykset: A. Ahlström Oy, Fortum Power and Heat Oy, Metsähallitus, Metsäliitto Osuuskunta / Biowatti Oy, Stora Enso Oyj, UPM-Kymmene Oyj ja Vapo Oy. TEKES rahoitti projektia Puuenergian teknologiaohjelman kautta.

Projektin vastuullinen johtaja oli erikoistutkija, MML Antti Korpilahti Metsäteho Oy:stä. Projektiryhmään kuuluivat tutkija, DI, MH Kaarlo Rieppo, projektitutkija, MMM Sakari Suuriniemi ja työntutkijat Reima Liikkanen ja Kari Uusi-Pantti. Erikoistutkija Jouko Örn laski tuotantoketjujen päästöt tässä tutkimuksessa todettujen tuottavuuksien ja polttoainekulutusten perusteella. Projektissa tehtiin käytännön tasolla yhteistyötä erityisesti UPM-Kymmene Oyj:n ja Biowatti Oy:n kanssa. Yhteistyö koski hakkuutähteiden paalausketjun, irtonaisten hakkuutähteen kuljetukseen perustuvan tuotantoketjun sekä palstahaketuksen eri vaiheiden tutkimista.

## **2 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS JA AINEISTOT**

### **2.1 Käyttöpaikallahaketusketjut**

#### **2.1.1 Hakkuutähteen paalaukseen perustuva ketju**

Paalausmenetelmä edellyttää hakkuutähteen kasoisiin hakkuuta, kuten yleensäkin tähteen talteenotto. Paalit voidaan kuljettaa samalla kalustolla kuin ainespuutavara. Käyttöpaikalla tapahtuvaan haketukseen perustuvassa ketjussa päästään irti ns. kuumen ketjun ongelmista, joita on esim. väliavarastohaketusketjussa hakkurin ja kaukokuljetuskaluston välille. Paalaukseen ja käyttöpaikalla haketukseen perustuvassa ketjussa varastointi on helppo sovittaa erilaisiin paikallisiin ja ajallisiin olosuhteisiin.

Paalausta ja siihen perustuvaa tuotantoketjua tutkittiin UPM-Kymmene Oyj:n Pohjanmaan hankinta-alueella, jossa tutkimuksen aikana otettiin käyttöön ensimmäiset Suomeen hankitut oksapaalaimet. Ensimmäinen paalain, Ruotsissa kehitetty Fiberpack 370 tuli käyttöön vuoden 1999 lopussa. Se oli asennettu vanhan, tehdaskunnostetun Ösa-kaksiotehakkuukoneen alustalle (kuva 1). Kun paalaimen jatkokehittäminen ja markkinointi myöhemmin siirtyi Timberjack Oy:lle, on seuraavat paalainkoneet rakennettu Timberjack 1210 B -kuormatraktorin alustalle (kuva 2). Ensimmäinen sellainen valmistui käyttöön vuoden 2000 lopulla. Fiberpac 370 -paalain tekee jatkuvaa paalia, joka katkaistaan haluttuun pituuteen ketjusahalla. Paalin halkaisija on noin 70 cm ja tavoiteltu pituus 320 cm.



**Kuva 1.** Ensimmäinen Suomessa käyttöön otettu Fiberpack 370 -oksapaalain hakkuukonealustalle asennettuna. Omistaja Ris-Esset Ab, Ähtävä. Valokuvat Metsäteho Oy.



**Kuva 2.** Fiberpack 370 -oksapaalain keskikokoisen Timberjack 1210 B -kuormatraktorin alustalle asennettuna. Omistaja Konepalvelu Hölrin Oy, Korttesjärvi.

Paalainyksikön hinta ilman arvonlisäveroa on noin 1 milj. markkaa ja peruskunnostetun 1210B -kuormatraktorin hinta on noin 800 000 mk. Kuormatraktoriin on tehtävä joitakin muutoksia, mm. hydraulikkajärjestelmän tehoa on suurennettava ja sen käyttöä sovitettava eri komponenttien kesken. Paalaimen toiminnat on pitkälti automatisoitu ja se edellyttää ohjausjärjestelmän elektroniikka-asennuksia.

Paalauksen tuottavuutta tutkittiin kolmella työmaalla, jotka sijaitsivat Kannuksessa ja Vaasassa. Paalain toimi kahdessa vuorossa ja tutkimuksessa havainnoitiin myös kuljettajien välisiä tuottavuuseroja. Kannuksen tutkimustyömaat olivat tavanomaisia kuusikon avohakkuualueita, joissa hakkuutähde oli palstalla kasoissa. Vaasan tutkimustyömaa oli kaupungin puistometsäalueella, jossa hakkuu oli poikkeuksellisesti tehty miestyönä ja hakkuutähde oli erikseen kerätty kasoihin. Maasto oli tällä työmaalla tavanomaista kivisempää ja leimikolle oli jätetty runsaasti jättöpuita. Vuoden 2001 alussa tehdyissä tarkistusmittauksissa ensimmäisen, Ösa-hakkuukoneen alustalle rakennetun, koneen paalattavana oli runsaasti koivua sisältänyttä tähdettä ja toisen, kuormatraktorin alustalle tehdyn, koneen työmaa oli tavanomainen kuusikon pätehakkuu.

Hakkuutähdepaalien metsäkuljetusta tutkittiin Kannuksessa, jossa oli käytössä Lokomo 910 -kuormatraktori. Kuormatraktori on ns. pienikokoinen kuormatraktori, jonka kantavuus on 9 tonnia ja se on nykyisiin malleihin verrattuna hieman vanhahkoa tekniikkaa. Normaalilla kuormatilalla varustettuna Lokomo 910 -kuormatraktoriin mahtuu 9 - 10 hakkuutähdepaalia. Koneen kantavuutta ei pystytä hyödyntämään kokonaan hakkuutähdepaalien kuljetuksessa. Kuljetuksesta tehtiin tavanomainen metsäkuljetuksen aikatutkimus. Aikatutkimuksessa kuormatraktori kuljetti 6 kuormaa, ja metsäkuljetusmatka oli noin 300 m.

Hakkuutähdepaalien autokuljetusta tutkittiin Kannuksen - Pietarsaaren suunnalla. Aineisto käsitti kahden hakkuutähdepaalikuorman kuljetuksen puutavara-autolla. Lastaamista ja purkamista tutkittiin lisäksi hakkuutähdepaalien murskauskokeiden yhteydessä.

Hakkuutähdepaalien murskausta kokeiltiin suurilla mobiilimurskaimilla. Hakkureista tutkittiin Heinolan Sahakoneet Oy:n vuonna 2000 valmistamaa kuorma-autokäyttöistä rumpuhakkuria. Hakkuriyksikön kaikkien toimintojen - nosturin, hakkurin ja syöttölaitteiston käyttö sekä hakkeen puhallus kuormaan - käyttövoima otettiin auton moottorista. Sen teho oli 390 kW. Murskaimet sen sijaan olivat kuljetuslavetille rakennettuja ja niissä oli erilliset käyttömoottorit, joiden tehot olivat 600 - 728 kW. Murskaimia syötettiin joko erillisillä koneilla tai omalla nosturilla (Diamond Z).

Hakkuutähdepaalien murskauskokeet tehtiin UPM-Kymmene Oyj:n Pietarsaaren, Kajaanin ja Tervasaaren tehtailla. Samoilla laitteilla tehtiin myös irtonaisen hakkuutähteen murskaus- ja haketuskojeita. Tutkitut murskaimet olivat (kuvat 3 - 5):

- CBI Magnum Force 4860 HZ, (Huurinainen Oy, Kajaani)
  - vaakasyöttöinen roottorimurskain
  - syöttöaukko 1500 x 975 mm
  - moottorin teho 610 KW
- Diamond Z 1460 BL, (Vertainen Oy, Äänekoski)
  - roottorimurskain, suppilomainen syöttöaukko
  - syöttöaukon halkaisija 3500 mm
  - moottorin teho 728 KW
- Lundvik, (Lundvik, Pietarsaari)
  - vaakasyöttöinen vasaramurskain
  - syöttöaukon leveys 1500 mm
  - moottorin teho 600 KW
- TT-1310RML/Heinolan Sahakoneet Oy, (Hakeyhtymä Kankaanmäki Oy, Lammi)
  - rumpuhakkuri
  - syöttöaukko 1000 x 750 mm
  - moottorin teho 390 KW

CBI Magnum -murskain on vaakasyöttöinen. Sen syöttöpöytä on suuri, noin 400 cm pitkä ja 150 cm leveä.

Diamond Z -murskaimessa tavara pudotetaan pyörivään syöttösuppiloon. Kappalemäinen materiaali, myös oksapaalit, syöttyvät helposti, mutta laite ei oikein hyvin ime irtorisua sisäänsä.

TT-1310RML -rumpuhakkurissa on pienikokoinen syöttöpöytä, joka käännetään kuljetusasentoon hakkurin päälle hydraulisyylintereillä.



**Kuva 3.** CBI Magnum Force 4860 HZ -roottorimurskain, Huurinainen Oy, Kajaani.



**Kuva 4.** Diamond Z 1460 BL -roottorimurskain, Vertainen Oy, Konginkangas.



**Kuva 5.** TT-1310RML -rumpuhakkuri oksapaalien haketuksessa, Hakeyhtymä Kankaanmäki Oy, Tuulos.

Murskaustutkimukset tehtiin kesällä ja syksyllä 2000. Tutkimuksissa murskatut paalit olivat talvella hakatuista leimikoista paalattua hakkuutähdettä. Myös Ruotsista kesällä 1999 tuotujen hakkuutähdepaalien murskauksesta tehtiin aikatutkimuksia. Osa paaleista oli varastointikokeessa sijoitettuna metsätien varteen, osa peitettynä ja osa peittämättömänä.

Murskeista otettiin näytteitä (15 - 25 litraa/näyte) analyysijä varten. Niistä määritettiin

- tilavuuspaino,  $\text{kg/m}^3$
- kosteus, %
- palakojakauma.

Kosteus- ja tilavuuspainomääriä tehtiin omana työnä Helsingin Yliopiston metsäekologian ja metsävarojen käytön laitosten laboratorioissa sekä tilaustyönä UPM-Kymmene Oyj:n Pulp Centerissä. Palakojakaumia analysoitiin Pulp Centerissä ja VTT Energiassa (Jyväskylässä), jossa oli käytettävissä sekä selluhakkeen että polttohakkeen seulat.

Murskeiden laboriotutkimuksista saaduilla analyysituloksilla laskettiin murskeille energiasisällöt Finbion Puupolttaineiden laatuohje -julkaisussa esitetyllä tavalla. Tuloksista johdettiin yhtälöt hakkeen tilavuuspainon ja energiasisällön laskemiseksi kosteuden suhteen sekä kiintotilavuuden laskemiseksi kuorman massasta eri kosteuspitoisuudella. Analyyseistä saatuja tilavuuspainotietoja käytettiin tuottavuustutkimusten materiaalin määrän (kiintotilavuuden) määrittämiseen.



### 2.1.2 Irtonaisen hakkuutähteen kuljetukseen perustuva ketju

Irtohakkuutähteen metsäkuljetusta tutkittiin kesällä 1999 Luopioisissa ja Kangasalla UPM-Kymmene Oyj:n työmaalla. Irtotähteen metsäkuljetuksessa oli urakoitsija Ahti Salon keskikokoinen Timberjack 1010 -kuormatraktori. Koneessa oli kuormatila, jonka leveyttä voitiin hydraulisylintereillä varustetuin liukupankoin muuttaa (kuva 6). Kuormatilan oli suunnitellut ja valmistanut Sakari Mononen Karelian Puu ja Metalli Oy:ssä.

Kuormatilan leveys voitiin muuttaa 2,3:sta 4,3:een metriin. Kun kuormatilan pituus oli 5,0 metriä, kuormatilan kehystilavuus oli pienimmillään 23,3 ja suurimmillaan 43,7 m<sup>3</sup>. Kun hakkuutähdekuorma ulottuu laitojen yli ja on kukkuralla, sen kehystilavuus on vielä suurempi. Suurta kuormatilaa voidaan hyödyntää täysin tienvarsileimikoilla ja vastaavissa oloissa, joissa varastopaikalle voidaan kuljettaa leveä lasti.

Irtonaisen hakkuutähteen kaukokuljetusta tutkittiin Rauman ympäristössä. Tutkittavana oli porilaisen kuljetusliikkeen Hakonen S. ja Pojat Ky:n kehittämä ja rakentama hakkuutähdeauto (kuva 7). Sen kuormatilan koko oli noin 130 m<sup>3</sup>. Tähän mennessä hakeautojen kuormatilat ovat olleet 110 kuution luokkaa.

Kuljetustutkimuksen hakkuutähde murskattiin UPM-Kymmene Oyj:n Rauman voimalaitoksella Raumaster Oy:n valmistamalla hidaskierroksisella murskaimella. Sen murskauskapasiteettia ei tutkittu, koska tutkimusajan kohtana puuperäisen murskeen käyttömahdollisuus oli pieni.

Tutkimukseen kuului osatehtävänä kuvata irtonaisen hakkuutähteen kuljetukseen hyvin soveltuva ajoneuvoyhdistelmä. Enimmäismitoituksen mukaan olisi mahdollista rakentaa jopa 150 kuution kuormatila. Närkö Oy:lle annettiin alihankintatyönä tehtäväksi suunnitella tarkoitukseen sopiva vetoauton päällirakenne ja perävaunu varusteineen sekä esittää kaluston hankintahinta ja mahdolliset käyttökustannuksiin oleellisesti vaikuttavat seikat. Tavoitteena oli saada luotettavat perusteet irtonaisen hakkuutähteen kaukokuljetuksen suorituskyvystä ja kustannuksista tuotantoketjujen vertailuja varten. Selvitystyön arveltiin samalla nopeuttavan hakkuutähteen autokuljetuskaluston kehittämistä ja parantavan valmiuksia kuljetusten aloittamiseen.

Irtonaisen hakkuutähteen murskausta ja haketusta kokeiltiin samoilla laitteilla kuin paalienkin murskausta:

- Diamond Z -roottorimurskaimella
- CBI Magnum -roottorimurskaimella
- TT-1310RML -rumpuhakkurilla.



**Kuva 6.** Hakkuutähdevarusteisella kuormatraktorilla kuorman keskikoko oli yli 10 m<sup>3</sup>, metsäkoneyrittäjä Ahti Salo, Pälkäne.



**Kuva 7.** Kuljetusliike Hakonen S. ja Pojat Ky:n (Pori) rakentama hakkuutähdeauto, jossa on teleskooppirunkoinen perävaunu.

### **2.1.3 Hakkuutähdepaalien murskaus- ja haketusaseman kapasiteetti ja kustannusarvio**

Heinolan Sahakoneet Oy teki projektiin alihankintatyönä kiinteiden murskaus- ja haketusasemien rakennepiirroksot sekä esitti arviot asemien kapasiteeteista ja kustannuksista. Haketus- ja murskausasemien kapasiteettiarvioita varmennettiin ja tarkennettiin em. mobiilikalustolla tehdyin kokein. Voimalaitosympäristöön sijoitettavan murskausaseman kustannusperusteita tarkennettiin mm. johtoryhmän jäsenten asiantuntemuksella.

## **2.2 Tienvarsi- ja palstahaketusketjut**

Tienvarsihaketuksen tuottavuustiedot perustuvat Bioenergian tutkimusohjelmassa tuotettuihin tuloksiin. Perustana on Kotimaiset Energiat Pekka Lahti Ky:n kuorma-autoalustainen TT 910 Evolution energiapuuhakkuri.

Palstahaketusketjuja tutkittiin UPM-Kymmene Oyj:n työmailla Jämsänkoskella ja Biowatti Oy:n työmailla Hämeenkyrössä. Tutkitut koneet olivat Jokihake Oy:n ja T:mi Rajainmäen palstahakkureita. Kummassakin koneessa oli 520 hv:n käyttömootorilla varustettu Bruks 803 CT -hakkurilaitteisto. Jokihake Oy:llä alustakoneena suurikokoinen Valmet 890 ja T:mi Rajainmäellä suurikokoinen Timberjack 1840 -kuormatraktori. Rajainmäellä oli kuormatilassa vaaka, jolla tutkitut kuormat punnittiin. Jokihakkeen hakkurin kuormat punnittiin pyöräpainovaakoilla.

Hakkuutähde oli palstalla kasoilla. Jokihake Oy:n työmaalla maasto oli hie-man kaltevaa ja kivistä ja hakkuutähde oli ruskeaneulasista. Rajainmäki korjasi ruskeaa hakkuutähdettä tasaisesta maastosta ja vihreää tähdettä mäkisestä maastosta. Ruskeaa tähdettä oli varastoitu tien varteenkin. Se tarjosi mahdollisuuden tutkia palstahakkurin tuottavuutta välivarastolla haketuksessa.

## **2.3 Vertailulaskelmat**

Hakkuutähteiden paalaukseen ja irtonaisten tähteiden kuljetukseen perustuvia käyttöpaikallahaketusketjuja verrattiin tienvarsihaketukseseen ja palstahaketukseseen. Tuottavuudet, vuosisuoritteet ja tuotantokustannukset määritettiin hankintavaiheittain. Laskelmat tehtiin ensisijaisesti kiintokuutiometriperustaisesti. Tämän tutkimuksen aikana tehdyt punnitukset ja kiintotilavuusmääritykset antoivat perusteet aiempaa tarkempiin määrälaskelmiin, nimen omaan kiintotilavuuksina. Muunnokset irtotilavuuksiksi perustettiin tutkimushavaintoihin ja muunnokset energiasisällöksi voitiin tehdä materiaalin kosteustiedon perusteella. Vertailulaskelmat tehtiin vastaamaan hakkuutähteen 50 %:n kosteutta.

Leimikko- ja hakkuutähteen kertymätietoina käytettiin Bioenergian tutkimusohjelmassa Chipset -palstahakkurin seurantatutkimuksessa saatuja tietoja. Siinä keskimääräinen työmaakohtainen hakekertymä oli 340 i-m<sup>3</sup> eli

noin 140 m<sup>3</sup>. Kun hakkuutähteestä saadaan talteen 70 %, niin kertymä on noin 100 m<sup>3</sup>/ha ja työmaan koko on noin 1,4 ha. Metsävaiheen laskelmat tehtiin näillä tiedoilla. Tutkimuksen päättyessä voidaan todeta, että Pietarsaaren ympäristössä noin vuoden ajan toimineen ensimmäisen paalauskooneen seuranta-aineistosta laskettu keskimääräinen työmaa oli 130 m<sup>3</sup>.

Tuotantoketjujen laskennassa käytettiin Metsäteho Oy:n metsäkoneiden ja puutavara-autojen sekä palstahakkurin tuotos- ja kustannuslaskentasovelluksia. Ne muokattiin vastaamaan kulloinkin kyseessä olevaa työyksikköä ja olosuhdetta. Käyttöpaikalla tehtävän murskauksen ja haketuksen kustannusten laskemiseksi laadittiin omat laskentasovelluksensa. Ketjujen vertailulaskelmat tehtiin kaksilla kuljetusmatkoilla: metsäkuljetusmatka 150 metriä ja kaukokuljetusmatka 40 kilometriä sekä vastaavasti 300 m ja 80 km.

Tuotos- ja kustannuslaskelmat tehtiin pääosin 10 kuukauden 2-vuorotyön mukaan. Vuotuinen työaika on silloin 3360 h. Koneiden käyttöaika laskettiin kullekin koneelle arvoidun käyttöasteen perusteella.

Aikatutkimuksista paalaimelle, palstahakkurille ja kuormatraktoreille saadut tehoaikatuottavuudet muunnettiin käyttöaikatuottavuuksiksi lisäämällä ajanmenekkiä puunkorjuun tuottavuustutkimusten tuloksia soveltaen. Kelloaikatutkimuksissa lyhyiden keskeytysten osuudeksi on saatu hakkuukoneille 19,7 ja kuormatraktoreille 8,4 % ja pitkäköön aikaa kestäneissä seurantatutkimuksissa lisäksi 24,5 ja 22,4 %. Tässä tutkimuksessa paalauskooneen, palstahakkurin ja metsäkuljetuskoneiden käyttöaikatuottavuudet laskettiin siten, että tehoaikaan lisättiin ensin 10 ja sitten 22 % eli yhteensä 34,2 %.

### 3 TULOKSET

#### 3.1 Kosteus, tilavuuspaino ja energiasisältö

Tuottavuustutkimuksissa käsitellyn materiaalin - hakkuutähteen, hakkeen ja murskeen - määrän määrittämiseksi perustettiin tutkimuksen aikana tehtyihin punnituksiin ja näytteistä mitattuihin kosteuksiin ja tilavuuspainoihin. Seuraavassa esitetään hakkuutähteen kosteuden ja tilavuuspainon vaihtelun havainnollistamiseksi yhden metsäkuljetustyömaan ja kuuden eri paikoista haetun autokuorman näytteistä saadut tulokset.

Hakkuutähdekuormat ovat samasta kohteesta. Hakkuutähteen määrä oli runsaat 60 m<sup>3</sup> ja se kerättiin yhtenäiseltä, vajaan hehtaarin alueelta melko suuria-alueisesta leimikosta. Hakkuutähteet kerättiin kesäkuun puolivälissä (1999) ja leimikko oli hakattu noin kuukausi aiemmin. Hakkuutähteet murskattiin mobiilimurskaimella (Kuljetusliike Viikari Oy, Lokomo-murskain) heti metsäkuljetuksen jälkeen ja mursketta otettiin kolme - neljä kertaa kustakin kuormatraktorikuormasta. Murske sekoitettiin ja laboratoriotyönkin yhteydessä näyttemateriaalia pyrittiin homogenisoimaan lisää.

Kuormakohtaisten kosteusnäytteiden keskiarvot vaihtelivat 27,1:stä 40,8:aan prosenttiin. Kaikkien näytteiden keskiarvo oli 33,9 (taulukko 1). Suhteellinen poikkeama keskiarvosta oli siten  $\pm 20$  %.

Kuormien sisäinen kosteusvaihtelu oli pienimmillään 1,2, suurimmillaan 9,0 ja keskimäärin 3,9 %-yksikköä.

Hakkuutähteen kiintokuutiopainot määritettiin siten, että noin 10 litran astia laitettiin lähes täyteen murskettua, punnittiin ja täytettiin vedellä. Murskeen tilavuus laskettiin vähentämällä astian tilavuudesta siihen mahtunut veden määrä.

Tilavuuspainot vaihtelivat lähes kosteustulosten suuntaisesti, poikkeuksena kuitenkin kuormien 2 ja 3 tulokset (taulukko 1). Kuormien sisäisten tilavuuspainojen vaihtelu oli 1-kuormalla suuri; suurimman ja pienimmän arvon erotus poikkesi keskiarvosta 15 %. Muilla kuormilla vastaava poikkeama oli keskimäärin alle 4 %.

**TAULUKKO 1** Hakkuutähteen kosteudet ja tuoretilavuuspainot metsäkuljetustutkimuksen kuormissa

Kuorma	Kosteus		Tilavuuspaino	
	näyte	%	näyte	kg/m <sup>3</sup>
1	1	29,8	1	670
	2	28,6	2	703
	3	29,2	3	666
			4	598
	keskiarvo	29,2	keskiarvo	659
2	1	33,6	1	701
	2	35,0	2	703
	3	36,9	3	715
			4	690
	keskiarvo	35,2	keskiarvo	702
3	1	35,7	1	708
	2	29,7	2	703
	3	30,0	3	714
			4	687
	keskiarvo	31,8	keskiarvo	703
4	1	39,7	1	799
	2	40,8	2	805
	3	41,9	3	765
			4	773
	keskiarvo	40,8	keskiarvo	786
5	1	42,9	1	735
	2	40,3	2	755
	3	33,9	3	729
			4	746
	keskiarvo	39,0	keskiarvo	741
6	1	27,2	1	700
	2	26,1	2	680
	3	27,8	3	700
			4	695
	keskiarvo	27,1	keskiarvo	694
<b>Keskiarvo kaikista</b>		<b>33,9</b>		<b>714</b>

Hakkuutähteen autokuljetusta tutkittiin Rauman ympäristössä kesäkuun alussa 1999. Tutkitut neljä kuormaa haettiin eri paikoista siten, että tutkimukseen saatiin ominaisuuksiltaan vaihtelevaa hakkuutähdettä. Materiaalit olivat seuraavanlaiset:

kuorma 1: pitkiä latvuksia ja rankaa runsaasti, ruskeaa

kuorma 2: yli talven palstalla ollutta ruskeaa hakkuutähdettä, autokuljetus välittömästi metsäkuljetuksen jälkeen

kuorma 3: keväällä hakattua, vihreää, kuivahtanutta

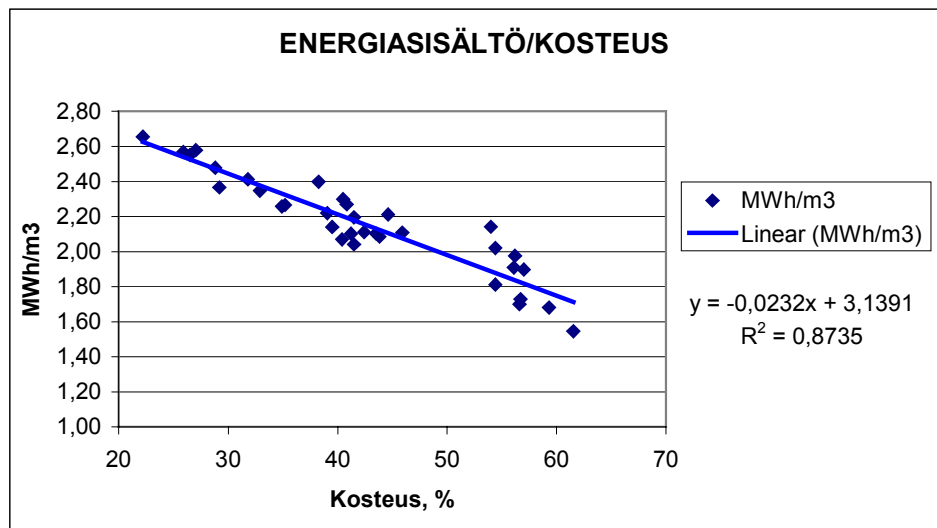
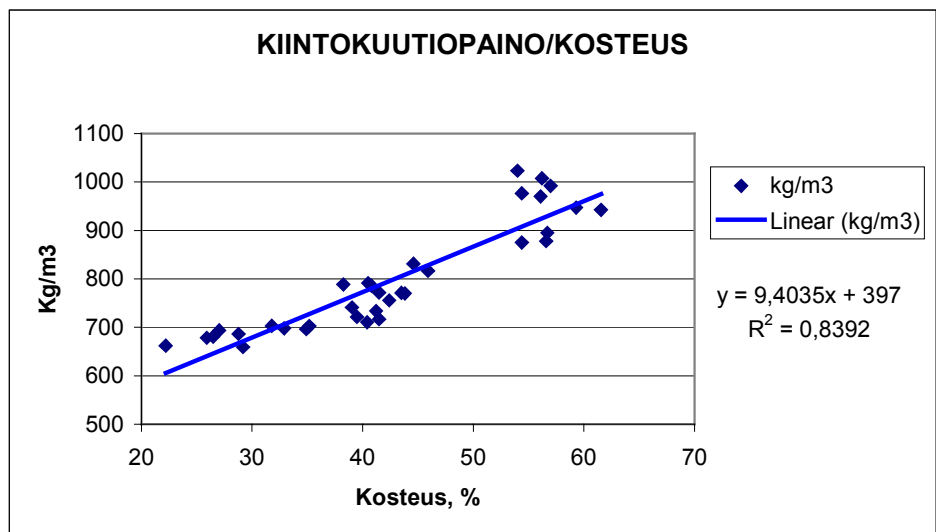
kuorma 4: talvella hakattua ja kerättyä vihreää tähdettä, auman pohjalla jäätä

Näytteet otettiin voimalaitoksella murskauksen jälkeen kuljetushihnalta. Vaikka näytemateriaalia saatiin tasaisesti koko kuormasta ja analyysikäsitelyyn otettaessa sitä vielä sekoitettiin, tulokset osoittivat näytteiden välisen vaihtelun melko suureksi (taulukko 2). Kuormakohtaisten näytteiden mini- ja maksimikosteuden erot poikkesivat keskiarvokosteudesta 3:sta 11:een %-yksikköä. Suhteelliset poikkeamat olivat silloin 8 - 30 %. Vastaavat kiintokuutiopainojen erot poikkesivat keskiarvosta 7 - 14 %.

TAULUKKO 2 Näytteistä määritetyt hakkuutähteen kosteudet ja tuoretilavuuspainot autokuljetustutkimuksen kuormissa

Kuorma	Kosteus		Tilavuuspaino	
	näyte	%	näyte	kg/m <sup>3</sup>
1	1	30,7	1	743
	2	32,8	2	688
	3	41,3	3	645
			4	708
	keskiarvo	34,9	keskiarvo	696
2	1	39,0	1	740
	2	44,1	2	780
	3	48,3	3	765
			4	795
	keskiarvo	43,8	keskiarvo	770
3	1	39,9	1	821
	2	36,9	2	728
	3	38,0	3	779
			4	825
	keskiarvo	38,3	keskiarvo	788
4	1	63,1	1	887
	2	63,6	2	935
	3	57,9	3	977
			4	971
	keskiarvo	61,5	keskiarvo	943

Tutkimuksessa saatujen kosteus- ja tilavuuspainotietojen perusteella laadittiin yhtälöt kuutiopainon ja energiasisällön määrittämiseksi kosteuden suhteen (kuva 8). Yhtälöillä voidaan muuntaa hakkuutähteen tai hakkeen ja murskeen massa kiintokuutioksi, kun materiaalin kosteus on määritetty. Kiintokuutiot voidaan edelleen muuntaa energiamääräksi. Muuntoluvuksi voidaan laskea myös MWh/t kosteuden suhteen. Energiasisältö laskettiin Finbion julkaisemassa Puupolttoaineiden laatuohjeessa esitettyllä tavalla. Hakkuutähteen tehollisena lämpöarvona, MJ/kg kuiva-ainetta, käytettiin ohjeessa esitetyn vaihteluvälin (18,5 - 20) keskiarvoa (19,25). Tulokseksi saadut yhtälöt antavat 50 %:n kosteudella kuutiopainoksi 867 kg ja energiasisällöksi 1,98 MWh/m<sup>3</sup>.



**Kuva 8.** Hakkuutähteestä eri tuottavuustutkimusten yhteydessä otetuista näytteistä määritetyt tilavuuspainot ja energiasisällöt.

## 3.2 Hakkuutähteen paalaus ja kuljetus

### 3.2.1 Hakkuutähteen paalaus

Paalain tekee hakkuutähteestä noin 70 cm paksua, tiiviiksi puristettua, jatkuvaa paalia. Paalin ympärille kierretään sisälmarua 60 cm:n välein muutamia kierroksia. Vaikka narua ei mitenkään sidota, niin ristikkäin kireään pyöritetyt narukierrokset pitävät hyvin. Jatkuva paali katkotaan ketjusahalla halutun pituisiksi kappaleiksi. Tavoitepituus on ollut 320 cm, koska sellaisia sopii ajoneuvoyhdistelmän vetoautoon kaksi ja perävaunuun kolme nippua.

Paalien pituuksia mitattiin tutkimuksen aikana eri yhteyksissä. Usein paalit olivat selvästi tavoitepituutta lyhyempiä (taulukko 3). Poikkeamat johtuivat alkuvaiheessa teknisistä syistä ja myöhemmin siitä, että paalien pituuteen ei kiinnitetty huomiota.

Paalien haketus- ja murskauskokeiden yhteydessä otetuista näytteistä määritettiin kosteudet ja tilavuuspainot. Tilavuuspainon perusteella laskettiin paalien kiintotilavuudet ja kiintotilavuusprosentit. Kosteustietoa puolestaan käytettiin paalien energiasisällön laskemisessa (taulukko 4).

TAULUKKO 3 Tutkimuksessa todettuja oksapaalien pituuksia, paksuuksia ja niiden perusteella lasketut paalien koot (kehystilavuudet)

Koetilanne	Pituus, cm	Paksuus, cm	Koko, m <sup>3</sup>
Paalaus 1	304	67	1,08
Paalaus 2	302	76	1,37
Paalaus 3	288	70	1,11
Murskaus 1	320	73	1,33
Murskaus 2	303	68	1,09
Murskaus 3	302	69	1,13
Murskaus 4	290	68	1,05
Murskaus 5	338	69	1,26
Tavoite	320	70	1,23

TAULUKKO 4 Tutkimuksessa määritetyt oksapaalien ominaisuudet ja energiasisällöt sekä tavoitepituuselle paalille lasketut vastaavat arvot

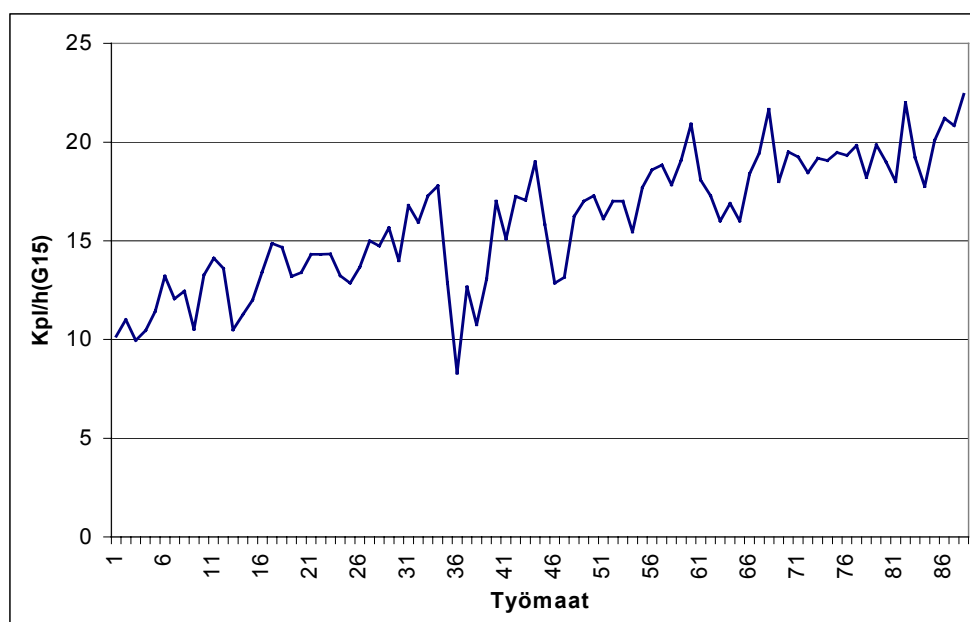
Koetilanne	Paalin koko, m <sup>3</sup>	Paalin paino, kg	Kiintotilavuus		Kosteus	Energiaa
			%	m <sup>3</sup> /paali	%	MWh/paali
Murskaus 1	1,33	459	38	0,508	56	0,91
Murskaus 2	1,09	339	37	0,398	50	0,76
Murskaus 3	1,13	408	41	0,466	54	0,85
Murskaus 4	1,05	421	47	0,494	50	0,94
Tavoite	1,23	480	45	0,554	50	1,10



Paalien kiintotilavuusprosentti vaihteli välillä 37 - 47. Ruotsissa 1998 - 1999 tehtyjen kolmen paalauskokeen tuloksista lasketut paalien tiiviyydet olivat 44, 47 ja 47 %. Taulukkoon 4 on laskettu tavoitepituisen paalin kiintotilavuus 45 % tiiviydellä ja energiasisältö 50 % kosteudella (1,98 MWh/m<sup>3</sup>). Jos tavoitekokoisen paalin kosteus olisi vain 35 %, niin sen energiasisältö olisi 1,3 MWh.

Paalauksen aikatutkimuksessa seurattiin kahden kuljettajan työskentelyä. Kun kuljettajilla oli 1 - 3 kuukauden kokemus paalauskokeen käyttäjänä, niin tehoajan tuottavuus oli 1-kuljettajalla 16 - 17 paalia tunnissa ja 2-kuljettajalla 22 - 32 paalia tunnissa. Myöhemmin koneen kuljettajana jatkoi 1-kuljettaja yksinään. Vuotta myöhemmin erittäin hyvissä olosuhteissa hänen paalausnopeutensa oli lähes 40 paalia tehotunnissa. Vastaavaan aikaan toisen Suomeen hankitun paalauskokeen tuottavuus oli noin 25 paalia tehotunnissa. Kohteen olosuhteet olivat selvästi edellistä huonommat ja kuljettajalla oli paalauskokemusta vain noin kaksi kuukautta. Näissä tuottavuustutkimuksissa paalien keskipituudet olivat 288 - 304 cm.

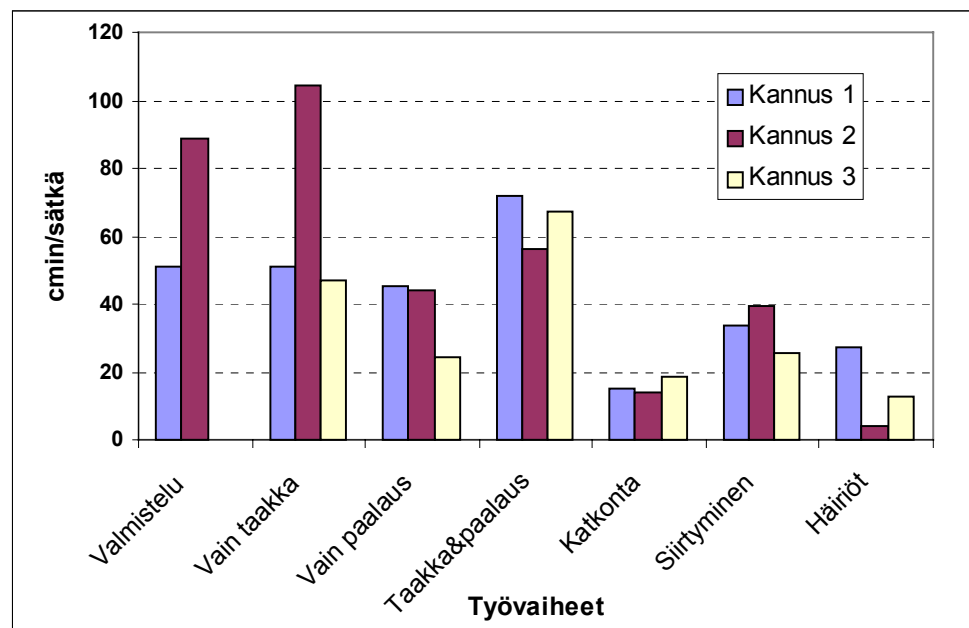
Koska paalaustekniikka on uutta, paalauksen tuottavuus suurenee sekä kuljettajien tottumuksen mukaan että koneiden teknisen parantumisen myötä. Ensimmäisen koneen tuottavuutta on kartoitettu seurantatutkimuksen avulla noin vuoden ajan (kuva 9). Tuottavuus on kehittynyt suotuisasti ja on nyt tasolla 20 paalia/h. Työaikaan on silloin sisällytetty lyhyet keskeytykset.



**Kuva 9.** Paalauksen tuottavuuden kehittyminen seurantatutkimuksen mukaan Fiberpac 370 -prototyypikoneella.

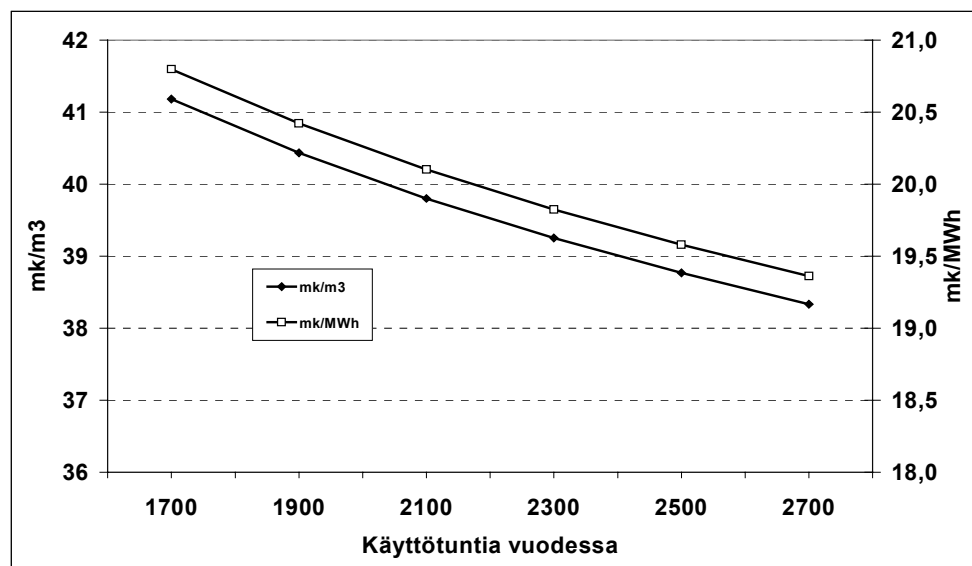
Paalauksen työvaiheittaisissa ajanmenekeissä oli merkittäviä eroja kuljettajien välillä (kuva 10). Kahdella tutkitulla työmaalla kolmesta oli sama kuljettaja (Kannus 1 ja 3). Toinen kuljettaja on tämän aikatutkimuksen mukaan käyttänyt paljon aikaa valmisteluun ja taakkojen kokoamiseen (Kannus 2). Huomattavan paljon aikaa on kulunut sellaiseen taakan hakemiseen (työnvaihe vain taakka), jolloin paalaustoiminto on odottanut. Toisaalta myös paalaus on toisinaan aiheuttanut viivettä, samoin paalin katkaisusahaus.

Näidenkin havaintojen perusteella voidaan arvioida, että paalauksen tuottavuutta voidaan parantaa merkittävästi. Myös talvella 2001 todettiin pelkkä taakan kokoaminen aikaa vieväksi; se oli edelleenkin 50 - 70 cmin/paali.

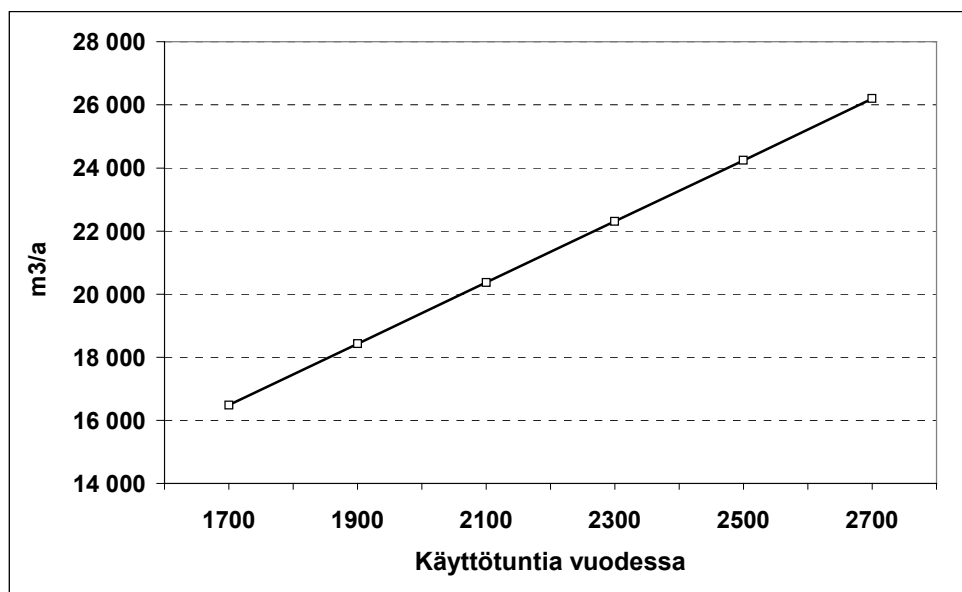


**Kuva 10.** Paalauksen työvaiheittaiset ajanmenekit kuljettajittain: kuljettaja 1: Kannus 1 ja 3; kuljettaja 2: Kannus 2.

Seuraavissa kuvissa (kuvat 11 ja 12) esitetään hakkuutähteiden paalauksen kustannukset ja vuosisuorite käyttöajan suhteen. Laskelmien perustana on paalaustuottavuus 25 kpl tehotunnissa. 10 kuukauden kaksivuorotyö merkitsee 2 520 käyttötuntia vuodessa ja 376 mk käyttötuntikustannuksia.



**Kuva 11.** Hakkuutähteen paalauksen yksikkökustannukset (mk/m<sup>3</sup> ja mk/MWh) vuotuisen käyttöajan mukaan.

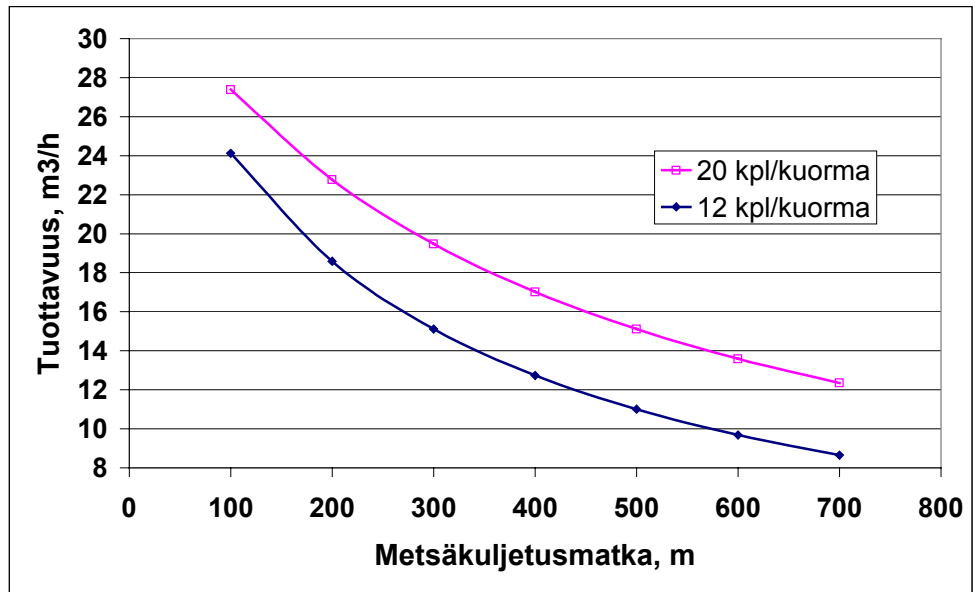


**Kuva 12.** Hakkuutähteen paalauksen vuosisuorite käyttöajan mukaan.

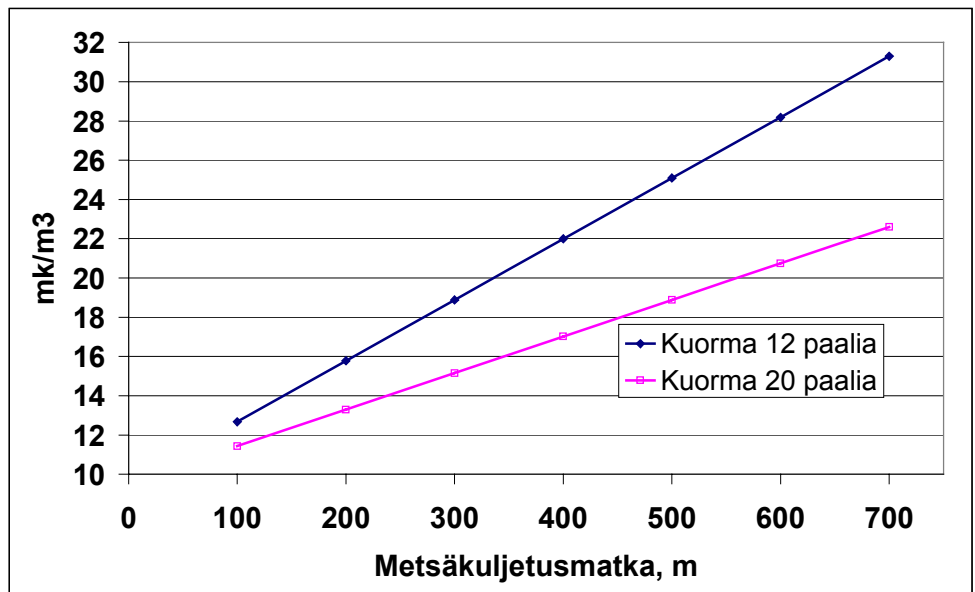
### 3.2.2 Paalien metsäkuljetus

Hakkuutähdepaalien metsäkuljetus on hieman ongelmallista, sillä kuormatraktorin kuormatilaan sopii vähän yli 3-metrisiä paaleja hyvin vain yksi nippu. Jos kuormatila olisi niin pitkä, että siihen mahtuisi kaksi paalinippua peräkkäin, kuormasta tulisi kovin takapainoinen. Metsäkuljetuksessa tulisi käyttää vähintään keskikokoista kuormatraktoria ja mieluummin levennettävällä kuormatilalla varustettua konetta. Kuormakoot voisivat niillä olla 12 ja 20 paalia. Tuottavuus- ja kustannustarkastelut perustettiin näihin kuormakokoihin. Kuorman painoksi tulee näillä paalimäärillä 6 – 10 tonnia.

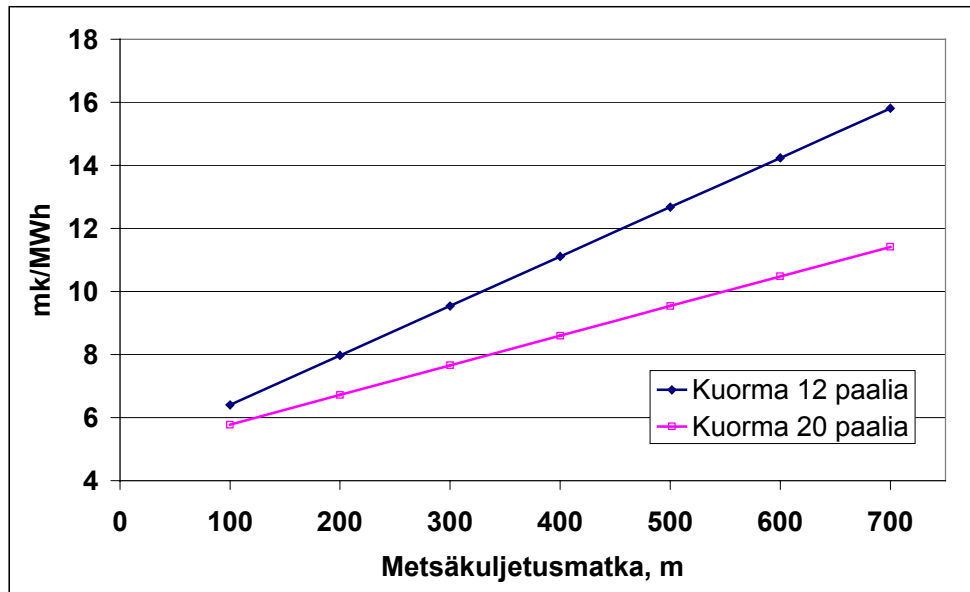
Kuvissa 13 - 16 esitetään oksapaalien metsäkuljetuksen tuottavuus ja kustannukset kuljetusmatkan suhteen sekä vuosisuorite käyttöajan suhteen. 10 kuukauden kaksivuorotyö merkitsee 2 855 käyttötuntia vuodessa ja 286 mk käyttötuntikustannuksia.



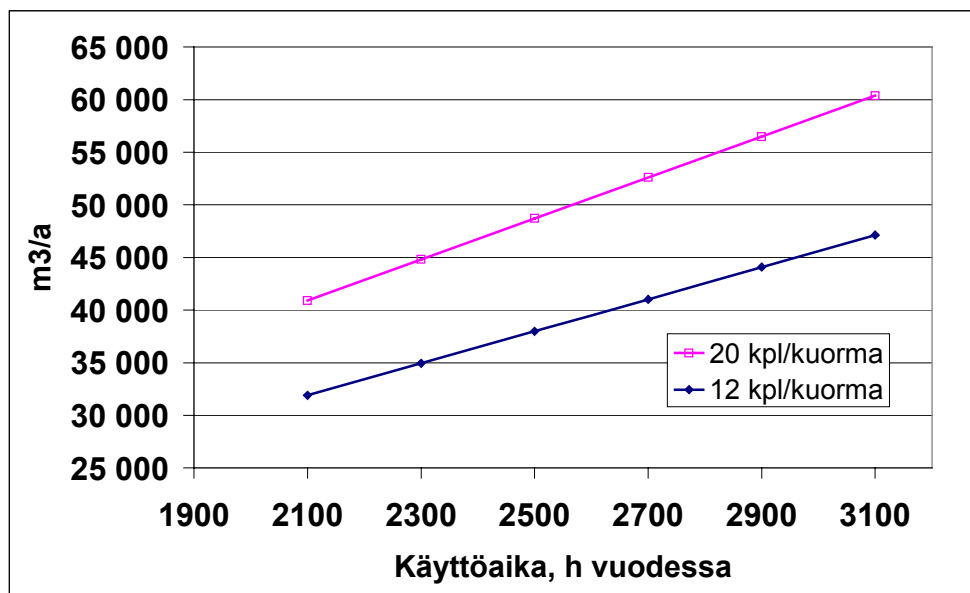
**Kuva 13.** Oksapaalien metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus kun kuorman koko on 12 ja 20 paalia.



**Kuva 14.** Oksapaalien metsäkuljetuksen kustannukset,  $\text{mk/m}^3$ , kun kuorman koko on 12 ja 20 paalia.



**Kuva 15.** Oksapaalien metsäkuljetuksen kustannukset, mk/MWh, kun kuorman koko on 12 ja 20 paalia.

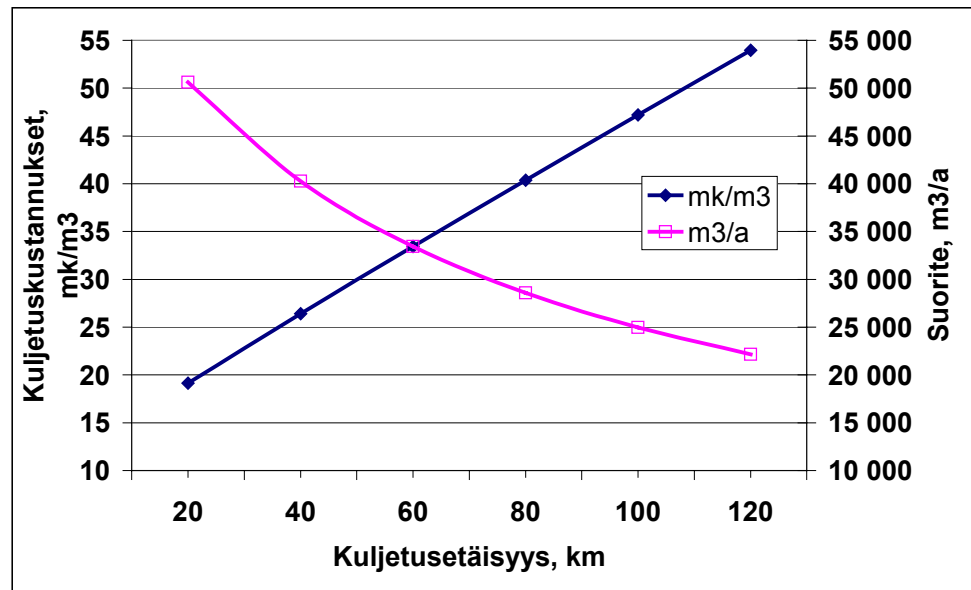


**Kuva 16.** Oksapaalien metsäkuljetuksen vuosisuorite 12 ja 20 paalin kuormilla kun kuljetusmatka on 300 m.

### 3.2.3 Paalien kaukokuljetus

Oksapaaleja voidaan kuljettaa tavanomaisella puutavara-autolla. Vetoautoon mahtuu kaksi paalinippua ja perävaunuun kolme. Kuorman koko on 65 - 70 paalia ja tuoreesta tavarasta tehtynä kuorma painaa 35 - 38 tonnia. Paalien autokuljetuksen vuosisuorite ja yksikkökustannukset on esitetty kuvassa 17.

Kuljetustyön aika on 80 km kuljetusetäisyydellä 3200 h vuodessa ja tunti-kustannukset 361 mk.



**Kuva 17.** Oksapaalien kaukokuljetuksen kustannukset (mk/m<sup>3</sup>) ja vuosisuorite (m<sup>3</sup>/a) kuljetusmatkan mukaan.

### 3.3 Irtonaisen hakkuutähteen metsä- ja kaukokuljetus

#### 3.3.1 Hakkuutähteen metsäkuljetus

Irtonaisen hakkuutähteen metsäkuljetuksen tulokset perustuvat tutkimuksiin, jotka tehtiin urakoitsija Ahti Salon (Pälkäne) Timberjack 1010 -kuormatraktorista. Kone on varustettu hakkuutähteen ajoon levennettävällä kuormatilalla.

Hakkuutähdekuormien keskikoko oli 10,3 m<sup>3</sup> (kiintokuutioita, taulukko 5). Hakkuutähteen kosteus vaikuttaa kuorman massaan. Kuorman koko ja massa riippuvat myös hakkuutähdekuorman tiivyydestä. Taulukossa esitetty tiiviyys laskettiin kuormatilan kehystilavuutta kohti. Se antaa lievän yliarvion, koska hakkuutähde ylittää kuormatilan laidat. Kuorman suuruus voi vaihdella myös siksi, että kuljettaja lastaa kuorman poikkeuksellisen suureksi. Sel-laista havaittiin esimerkiksi etäältä haettavien ja palstan viimeisten kuormien osalta (kuormat 6 ja 7).

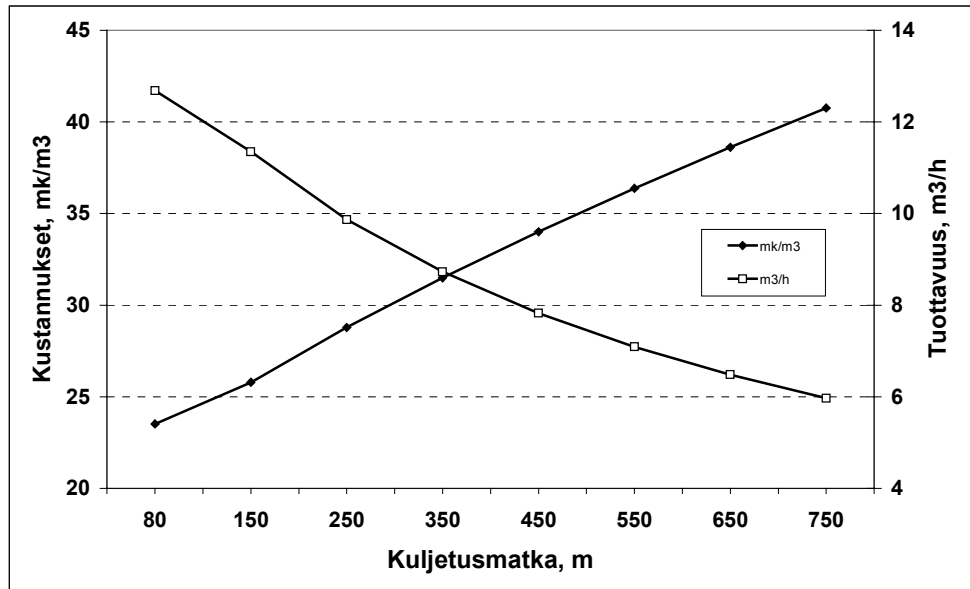
Kuormatilan etuosaa oli vaikea lastata täyteen. Kun hakkuutähde muodostaa pallomaisen taakan, niin koura pitää vetää etusermiin kiinni. Hakkuutähde muodosti niin korkean kuorman, että se esti kuormatilan etuosan kunnollisen lastauksen. Tämä merkitsee sitä, että nosturin mitoitus ja ominaisuudet on tarkistettava hakkuutähteen käsittelyyn sopiviksi.

TAULUKKO 5 Hakkuutähteen metsäkuljetustutkimuksen kuormat

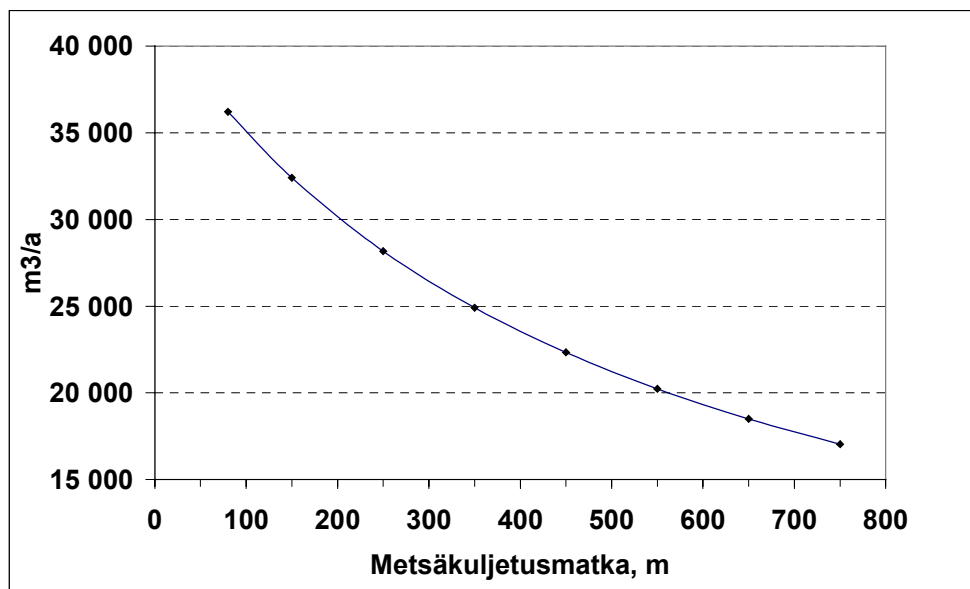
Kuorma	Kuorman koko		Kosteus	Tiiviys
	kg	m <sup>3</sup>	%	%
1	6 200	9,4	29	22
2	6 550	9,3	35	21
3	6 400	9,1	32	21
4	7 600	9,7	41	22
5	8 750	11,8	39	27
6	8 550	12,3	27	28
7	9 130	10,2	57	23
8	9 680	11,0	57	25
9	9 200	9,7	59	22
Keskiarvo		10,3		23



Kuorman tekoaika (kuormaus ja kuormausajo) oli keskimäärin 22,4 ja kuorman purkamisaika 6,1 min. Keskimääräinen ajonopeus oli noin 33 m/min. Seuraavassa (kuvat 18 ja 19) esitetään hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuus, yksikkökustannukset ja vuosisuorite. Tilavuus ilmoitetaan kuvaajissa kiintokuutiometreinä. Vuotuinen käyttöaika on 2 855 h ja tunti-kustannukset 281 mk.



**Kuva 18.** Hakkuutähteen metsäkuljetuksen käyttötuntutuottavuus (m<sup>3</sup>/h) ja yksikkökustannukset (mk/m<sup>3</sup>) levennettävällä kuormatilalla varustetulla kuormatraktorilla.



**Kuva 19.** Hakkuutähteen metsäkuljetuksen vuosisuorite levennettävällä kuormatilalla varustetulla kuormatraktorilla (käyttöaika 2 855 h/a).

### 3.3.2 Hakkuutähteen kaukokuljetus

Hakkuutähteen kaukokuljetus perustuu Hakonen S. ja Pojat Ky:n (Pori) valmistaman hakkuutähdeauton (kuva 7, s. 18) aikatutkimuksiin ja seurantatietoihin. Kuljetuksen tuottavuutta tutkittiin Rauman ympäristössä. Perävaunu on teleskooppirunkoinen. Kun perävaunu on vedetty lyhimmilleen, vaunun takaosa ylletään lastaamaan vetoautoon kiinnitetyllä nosturilla.

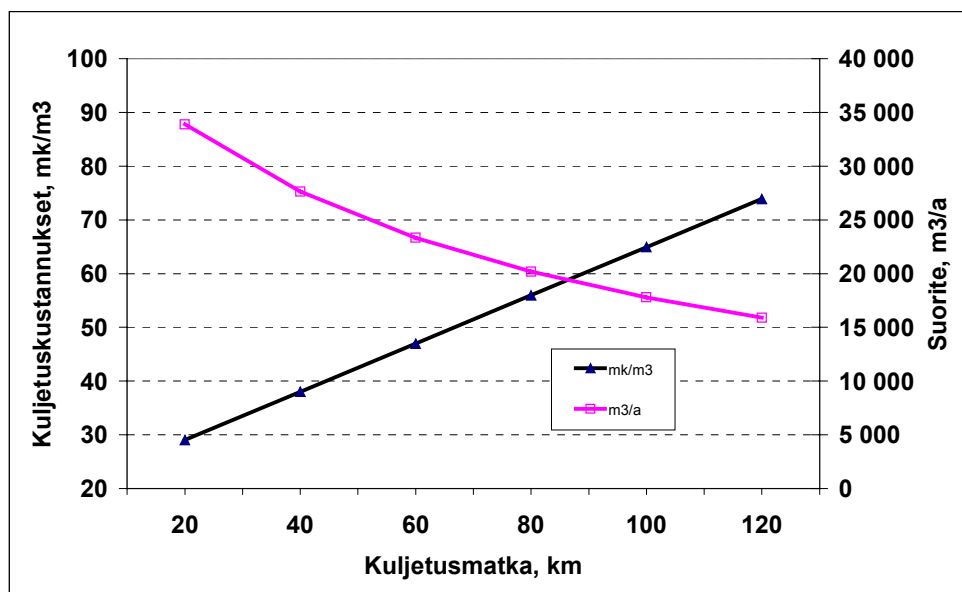
Tutkimusten aikaan kesällä 1999 autossa oli tavanomainen puutavaranoستوری. Sen rakenne ei mahdollistanut kuorman tiivistämistä koura suljettuna. Kuorma tiiviys jäi siten pieneksi, ja kiintotilavuus oli keskimäärin 15 % (taulukko 6). Kun ajoneuvoyhdistelmän kantavuus oli 31 500 kg, siitä jäi merkittävästi hyödyntämättä.

TAULUKKO 6 Hakkuutähteen autokuljetustutkimuksen kuormat

Kuorma	Kuorman koko		Kosteus %	Tiiviys %
	kg	m <sup>3</sup>		
1	10 600	15,2	35	12
2	15 000	19,5	44	15
3	14 800	18,8	38	14
4	23 700	25,2	62	19
Keskiarvo		19,7		15

Hakkuutähdeautoa on sittemmin kehitetty rakentamalla uusi vetoauton päällirakenne ja varustamalla auto kiinteällä, suuritehoisella nosturilla. Hakkuutähteet voidaan kuormattaessa puristaa tiiviiksi jo taakassa ja lisäksi tiivistää kuormatilassa. Kuorman keskimääräinen tiiviys on pitkäaikaisessa seurannassa ollut noin 22 %, ja sitä käytettiin irtonaisen tähteen kuljetusta koskevissa laskelmissa. Kuorman koko on silloin 28,6 m<sup>3</sup> ja paino noin 25 tonnia.

Seuraavassa kuvaajassa on esitetty hakkuutähteen kaukokuljetuksen yksikkökustannukset (mk/m<sup>3</sup>) ja vuosisuorite (m<sup>3</sup>/a). Tilavuus ilmoitetaan kuvaajissa kiintokuutiometreinä (kuva 20). Kun kuljetusmatka on 80 km, vuotuisen kuljetusaika on 3 200 h ja kustannukset 352 mk/h.



**Kuva 20.** Hakkuutähteen kaukokuljetuksen vuosisuorite ( $\text{m}^3/\text{a}$ ) ja yksikkökustannukset ( $\text{mk}/\text{m}^3$ ).

### 3.4 Haketus ja murskaus käyttöpaikalla

Hakkuutähteen haketus leikkaavilla terillä varustetulla hakkurilla on nopeampaa kuin murskaus vasara- tai roottorimurskaimilla. Murskainten suorituskyky riippuu merkittävästi materiaalista ja siitä, kuinka hienoksi se pitää murskata. Irtonainen hakkuutähte antaa varsinkin murskauksessa pienemmän vastuksen kuin kiinteäksi paalattu tähte. Siten haketus on edullisempaa kuin murskaus, mutta hakkurin terät ovat herkkiä vaurioitumaan kivien ja metallin vuoksi.

Irtonaisen hakkuutähteen haketuksen ja murskauksen tuottavuus riippuu oleellisesti siitä, kuinka tehokkaasti materiaali pystytään syöttämään. Paalit ovat helppoja käsiteltäviä ja niitä voidaan annostella syöttöpöydälle esimerkiksi autokuormasta auton omalla nosturilla siten, että ne menevät hakkuriin yhtenäisenä jonona. Irtonaisesta hakkuutähteestä sen sijaan on hankalaa saada tasaista materiaalivirtaa hakkuriin tai murskaimeen.

Mobiilikalustolla tehdyissä kokeiluissa Heinolan Sahakoneet Oy:n uusin hakkuutähdhakkuri, TT1310RML, osoittautui erittäin tehokkaaksi. Sen tuottavuus,  $167 \text{ m}^3/\text{h}$ , oli paalien haketuksessa enemmän kuin 1,5-kertainen roottorimurskaimiin verrattuna. Roottorimurskaimet puolestaan olivat selvästi tehokkaampia kuin vasaramurskain (taulukko 7).

TAULUKKO 7 Hakkuutähteen murskaus- ja haketuskokeilujen tulokset, tuottavuus tehoaikana

Laitte	Tyyppi	Materiaali	Tuottavuus, m <sup>3</sup> /h	Murskeen	
				kosteus-%	tiiviyys-%
CBI Magnum	Roottori-murskain	Paalit	117	54	39
		Paalit	102	57	41
		Irtotähde	84	54	38
Diamond Z	Roottori-murskain	Paalit	92	50	39
		Irtotähde	67	61	39
Lundvik	Vasara-murskain	Paalit	70	56	
		Paalit	70	51	
TT1310RML	Rumpu-hakkuri	Paalit	167	56	44
		Irtotähde	54	54	45

Murskauskokeilujen perusteella kiinteän aseman tehoajan murskauskapasiteetiksi asetettiin paaleilla 100 m<sup>3</sup> ja irtonaisella tähteellä 85 tunnissa. Tuotos- ja kustannuslaskelmat perustettiin 70 %:n käyttöasteelle. Vuosisuorite on silloin paalien murskauksessa 235 000 ja irtonaisen tähteen murskauksessa 200 000 kiintokuutiota. Murskausaseman investoinniksi arvioitiin 7,5 milj. markkaa. Paalien murskauskustannuksiksi saatiin 8,30 ja irtotähteen 9,60 mk/m<sup>3</sup>. Voidaan arvioida, että hakkuriin perustuva vastaavan tehoinen haketusasema olisi sekä perustamis- että käyttökustannuksiltaan murskausasemaa edullisempi.

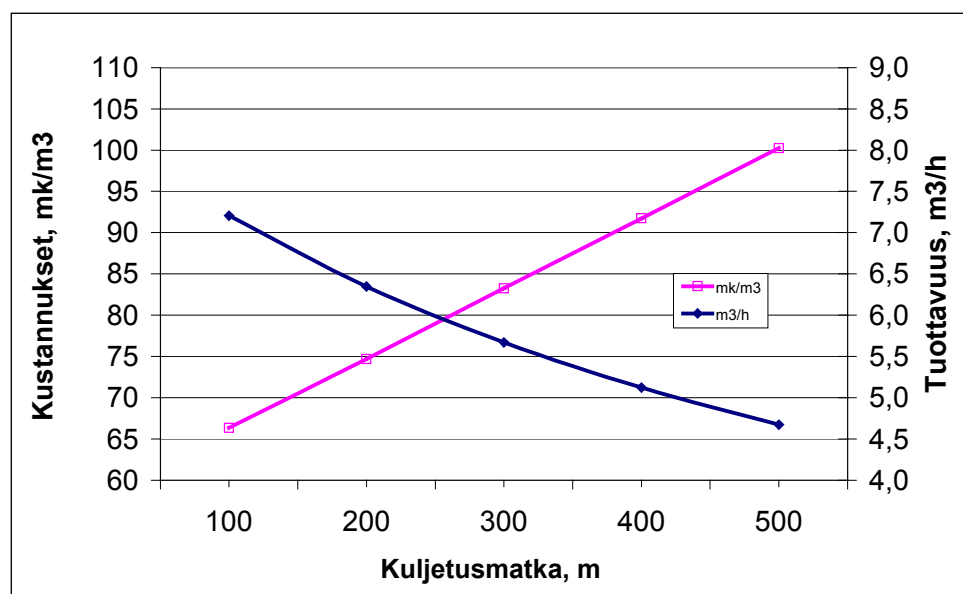
### 3.5 Tienvarsihaketuksen perustuva tuotanto

Tienvarsihaketusketjun tuottavuus perustuu Bioenergian tutkimusohjelmassa julkaistuihin tuloksiin Kotimaiset Energiat Ky:n TT 910 Evolution -hakkurista. Tämän kuorma-autoalustaisen rumpuhakkurin tuottavuus oli 46 hakekuutiota käyttötunnissa. Tässä tarkastelussa hakekuutiot muunnettiin kiintokuutioksi 40 %:n tiiviydellä, jolloin tuottavuudeksi saatiin 18,4 m<sup>3</sup> käyttötunnissa. Vuosisuoritteeksi saatiin 60 %:n käyttöasteella noin 37 000 m<sup>3</sup> ja tuotantokustannuksiksi 30 mk/m<sup>3</sup>. Hakkurin käyttöaika oli 2 000 h vuodessa ja kustannukset 547 mk/h.

Hakkeen kaukokuljetuksessa yhden hakeauton tuotos on 80 km kuljetusmatkalta noin 25 000 m<sup>3</sup> vuodessa ja kuljetuskustannukset 39 mk/m<sup>3</sup>. Kuljetustyytäika on 3 240 h vuodessa ja kustannukset 296 mk/h.

### 3.6 Palstahaketukseen perustuva tuotanto

Palstahaketuksesta Bruks -hakkureilla tehdyt tutkimukset osoittivat haketusvaiheen tuottavuuden pieneksi. Hakkuutähteen keräily ja syöttö hakkuriin veivät runsaasti aikaa; noin puolet mahdollisesta haketusajasta hakkuri pyöri tyhjänä. Palstahakkurin ajonopeus maastossa oli pienempi kuin kuorma-traktoreilla puutavaranaajossa. Näistä syistä palstahaketuksen tuottavuus oli pieni ja hakkeen tuotantokustannukset suuret (kuva 21). Tuottavuus oli 150 metrin kuljetusmatkalta 6,7 ja 300 metrin matkalta 5,7 m<sup>3</sup> käyttötunnissa. Vuosisuoritteet olivat vastaavasti 17 000 ja 14 400 m<sup>3</sup>, kun käyttöaika oli 2 520 h vuodessa. Käyttötuntikustannukset olivat 472 mk/h.



**Kuva 21.** Palstahaketuksen tuottavuus ja kustannukset kuljetusmatkan suhteen.

Palstahakkurin suorituskykyä pystytään hyödyntämään välivarastolla haketuksessa merkittävästi paremmin kuin palstalla haketuksessa. Koneen tuottavuus välivarastohakkurina sisältäen hakesäiliön tyhjentämisen lähistöllä oleviin vaihtolavoihin oli 17,5 m<sup>3</sup> käyttötunnissa. Se merkitsee 44 000 m<sup>3</sup>:n vuosisuoritetta. Palstahakkurin vuosituotos välivarastolla haketuksessa on siten suurempi kuin edellä esitetyn tienvarsihakkurin tuotos. Haketuskustannukset näillä koneilla sen sijaan ovat saman suuruiset.

### 3.7 Palakokojakaumat

Murskeista ja hakkeista määritettiin palakokojakaumia koeseulonnalla UPM-Kymmene Pulp Centerissä ja VTT Energiassa. Pulp Centerissä materiaali seulottiin selluhakkeen laatuselontan mukaan, VTT Energiassa sekä selluhakkeen että puupolttoaineiden laatuohjeessa esitetyn palakokoseulontan mukaisesti (taulukot 8 - 10).

Puupolttoaineiden laatuohjeessa esitetty palakokoluokitus on sellainen, että noin 90 % materiaalista sijoittuu pienimpään, alle 30 mm:n luokkaan. Tutkituissa näytteissä ei ollut yli 10 cm:n pituisia kappaleita ensinkään.

TAULUKKO 8 Hakuutähdepolttoaineen palakokojakaumat puupolttoaineiden laatuohjeen palakokoluokituksen mukaan

Murskauslaite	Materiaali	Seulalle jäänyt osuus massasta seulakoon mukaan, %				
		> 100 mm	60 mm	45 mm	30 mm	Pohja
CBI Magnum -roottori- murskain	vihreät paalit		1	2	6	91
	irtotähde			1	10	89
TT1310 RML -hakkuri	vihreät paalit		2	3	9	86
	irtotähde		1	2	7	90

Selluhakkeen laatuselontan mukaiset tulokset kuvaavat palakokojakauman tarkemmin kuin puupolttoaineseulonta. Sekä hakkeista että murskeista sijoittui 13 - 45 mm:n luokkaan yleensä vain runsaat 10 %. 7 - 13 ja alle 13 mm:n luokkien osuudet olivat kumpikin noin 40 % (taulukko 9 ja kuva 22). Materiaalin laadun vaikutuksesta ei tämän aineiston perusteella voida tehdä yleistyksiä, mutta ikääntyneellä ja huonosti varastoidulla materiaalilla hienon aineksen osuus näyttää suurentuneen murskauksessa.

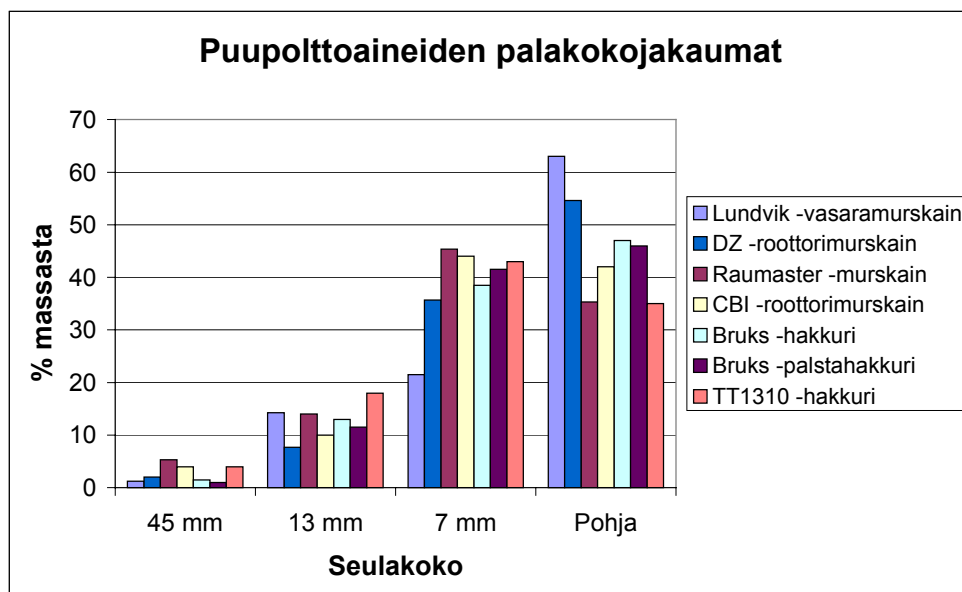
TAULUKKO 9 Hakkuutähdepolttoaineen palakokojakaumat selluhakkeen laatuselunnon mukaan

Murskauslaite	Materiaali	Seulalle jäänyt osuus massasta seulakoon mukaan, %					
		> 45 mm	Rako 8 mm	13 mm	7 mm	Tikut 3 mm	Puru < 3 mm
Lundvik -vasaramurskain	ruotsalaiset paalit	4	10	10	19	23	34
Bruks 803 -hakkuri	ruotsalaiset vihreät paalit		18	15	21	14	32
	ruotsalaiset ruskeat paalit	3	25	11	13	15	33
Raumaster -murskain	ruotsalaiset vihreät paalit	5	28	19	16	10	22
	ruotsalaiset ruskeat paalit	3	28	11	13	15	30
	irtotähde	8	38	12	13	10	19
CBI Magnum -roottorimurskain	vihreät paalit	5	22	10	17	24	22
	irtotähde	3	31	10	18	21	17
TT1310 RML -hakkuri	vihreät paalit	5	28	15	16	16	20
	irtotähde	3	25	21	17	15	19
Bruks 803 -palstahakkuri	vihreä tähde	2	15	12	23	21	27
	ruskea tähde		20	11	25	26	18
Diamond Z -roottorimurskain	vihreät paalit	2	16	8	20	38	16

TAULUKKO 10 Hakkuutähdemurskeen palakokojakaumat selluhakkeen laatuselunnasta hieman poikkeavan palakokoluokituksen mukaan

Murskauslaite	Materiaali	Seulalle jäänyt osuus massasta seulakoon mukaan, %				
		> 45 mm	30 mm	13 mm	7 mm	< 7 mm
Lundvik-vasaramurskain	peitettyinä varastoidut paalit		2	17	20	61
	peittämättä varastoidut paalit		1	11	17	71
	vihreät paalit	1	2	14	20	63

Murskaustekniikka vaikuttaa palakokoon enemmän kuin murskattava materiaali. Murskaimissa käytetään seulalevyjä palakoon säätelyyn ja hakkureissa puolestaan voidaan säätää terien asentoja. Nyt tutkitut murskaimet ja hakkurit tuottivat melko samanlaista polttoainetta (kuva 22). Kuitenkin Lundvik-vasaramurskaimella ja Diamond Z -roottorimurskaimella pienimmän jakeen osuus oli suurempi kuin muilla. Tasaisimmat palakokojakaumat ja vähiten pienintä jaetta tuottivat Raumaster -murskain ja TT1310 -rumpuhakkuri. Vaikka kyseiset laitteet ovat toiminnaltaan aivan erilaisia, niiden tuottamat palakokojakaumat olivat hyvin samanlaiset.



**Kuva 22.** Erilaisilla murskaus- ja haketustekniikoilla tuotettujen hakkuutähdepolttoaineiden palakokojakaumat.

### 3.8 Tuotantoketjujen vertailu

#### 3.8.1 Kustannukset ja suoritteet

Kustannusvertailu perustuu tuotantoketjujen eri vaiheista edellä esitettyihin tuottavuuksiin ja kustannuksiin. Käyttöaika tuottavuudet olivat noin 34 % tehoaika tuottavuuksia pienemmät. Kunkin työkoneen käyttöaste määritettiin erikseen. Vuotuinen työaika laskettiin 10 kuukauden 2-vuorotyön pohjalta ja se oli siten 3 360 h. Käyttöaika saatiin kertomalla työaika käyttöasteella. Esimerkiksi 75 % käyttöaste merkitsi 2 520 käyttötuntia vuodessa. Organisaatiokustannuksia, jotka johtuvat sekä puunhankinnan että puupolttoaineen hankinnan ja käytön organisaatioista, ei ole arvioitu eikä otettu tähän vertailuun mukaan.



Tuotantokustannusten ja vuosisuoritteiden arvioimiseksi esitetään tärkeimmät laskentaperusteet taulukossa 11 (määrät on ilmaistu kiintokuutioina).

TAULUKKO 11 Hakkuutähdepolttoaineen tuotannon laskentaperusteita: tuottavuus käyttöaikana ( $m^3/h$ ), vuotuinen käyttöaika (h/a), suorite vuodessa ( $m^3/a$ ), käyttötuntikustannukset (mk/h) ja tuotantokustannukset ( $mk/m^3$ )

Tuotantovaihe	$m^3/h$	h/a	$m^3/a$	mk/h	$mk/m^3$
Paalaus	9,7	2 520	24 500	376	38,70
Paalien metsäkuljetus (300 m)	15,2	2 855	43 300	286	18,90
Paalien kaukokuljetus (80 km)	4,22 *	3 200	28 500	361	40,50
Irtotähteen metsäkuljetus (300 m)	9,3	2 855	26 500	281	30,20
Irtotähteen kaukokuljetus (80 km)	4,55 *	3 200	20 100	352	56,00
Paalien murskaus	100	2 350	235 000	830	8,30
Irtotähteen murskaus	85	2 350	200 000	815	9,60
Haketus välivarastolla	18,4	2 000	36 800	547	29,70
Kuljetus hakeautolla (80 km)	5,77 *	3 240	24 700	296	38,80
Palstahaketus (300 m)	5,7	2 520	14 400	472	82,80
Kuljetus vaihtokonteilla (80 km)	5,00 *	3 180	23 400	359	48,80

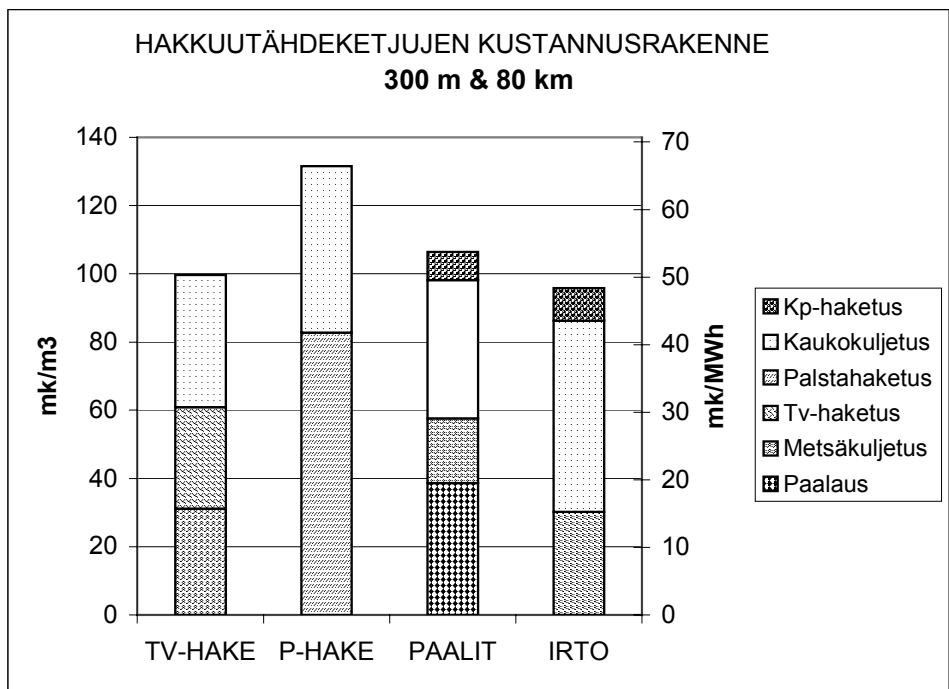
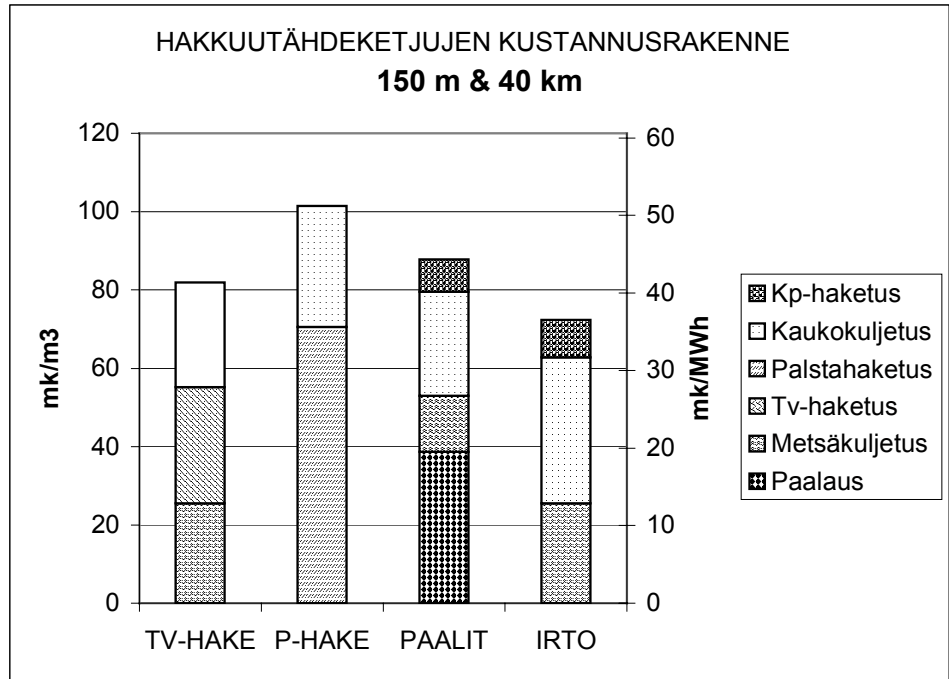
\* Kuormakohtainen aika, h/kuorma.

Kustannusvertailu osoitti irtonaisten hakkutähteen kuljettamiseen ja käyttöpaikallamurskaukseen perustuvan tuotantoketjun edullisimmaksi (kuva 23). Se on edullisimmillaan lyhyillä kaukokuljetusmatkoilla. Sen kehityspotentiaali kytkeytyy kuorman koon suurentamiseen, joka voidaan tehdä lähinnä kuorman tiivistämisen kautta.

Tienvarsihaketukseen perustuva tuotanto oli tässä tarkastelussa toiseksi edullisinta. Ero irtonaisten tähteen kuljetukseen perustuvaan ketjuun oli vain 4 %, kun kuljetusmatka oli 80 km. Hakkurin vuosituotos vastasi noin 1,5:n hakeauton kuljetusmäärää. Käytännössä kuljetusmatkan vaihtelut ja erisistä johtuvat keskeytykset lisäävät haketuksen ja kuljetuksen odotusaikoja ja suurettavat tuotantokustannuksia. Kun uudet välivarastohakkurit ovat tehokkaampia kuin se, mihinkä tämä tarkastelu perustui, välivarastohaketuksessa voidaan päästä tässä esitettyä edullisempiinkin tuloksiin.

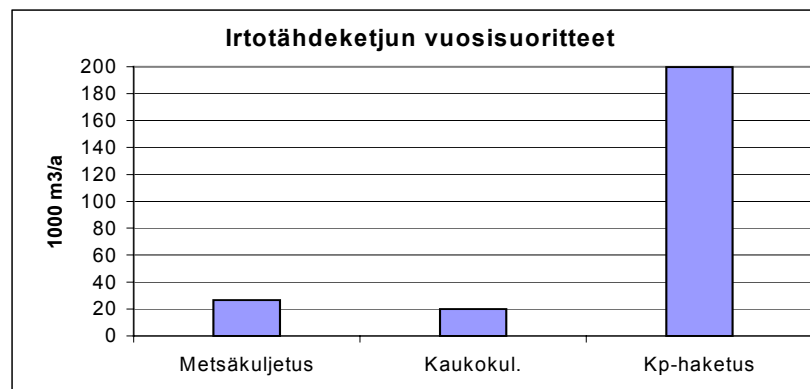
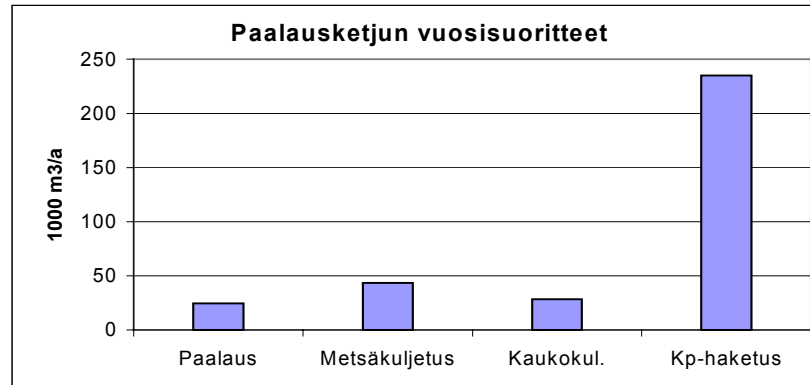
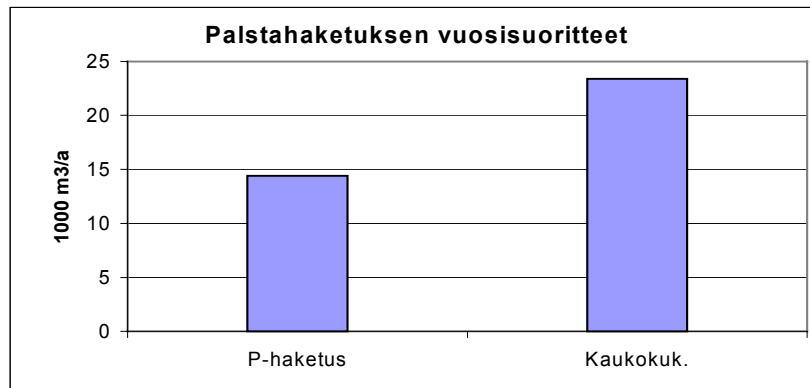
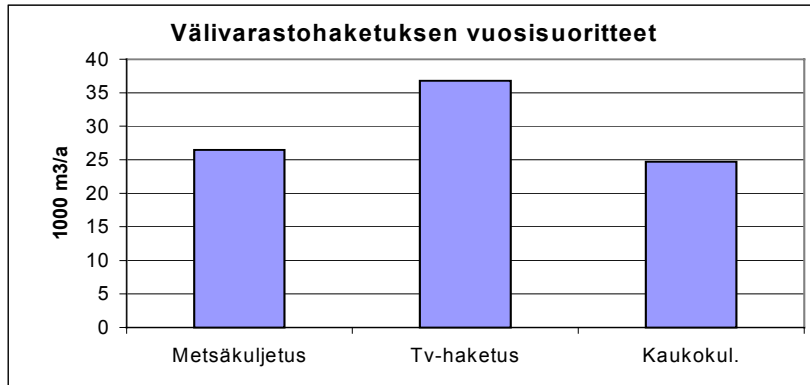
Paalaukseen perustuva tuotanto oli 10 - 20 % kalliimpaa kuin irtonaisten hakkutähteen käyttöpaikallahaketukseen perustuva tuotanto. Paalausketjun kilpailukyky paranee kun kuljetusmatka pitenee. Paalausketjun kalleus johtuu ennen muuta paalausvaiheen kalleudesta.

Palstahaketus oli hakkurin tehottoman syötön vuoksi hidasta ja kallista. Palstahaketukseen perustuva hakkeentuotanto oli irtotähdeketjua lähes 40 % kalliimpaa.



**Kuva 23.** Hakkuutähdehakkeen ja -murskeen tuotantokustannukset eri tuotantoketjuilla kun metsäkuljetusmatka on 150 m ja kaukokuljetusmatka 40 km sekä vastaavasti 300 m ja 80 km.

Tuotantoyksiköiden vuosisuoritteet voivat poiketa toisistaan huomattavastikin (kuva 24). Se aiheuttaa ongelmia ennen muuta toisistaan riippuvissa tuotantovaiheissa, kuten välivarastolla haketuksessa ja siihen liittyvässä kaukokuljetuksessa. Palstahaketuksessakin haketuksen ja kaukokuljetuksen kytkentä on joustavampi. Muilta osin tuotantoketjujen eri vaiheet voidaan tehdä vapaammin ajoitettuina.



**Kuva 24.** Hakuutähdehакkeen tuotantoyksiköiden vuosisuoritteet kun metsäkuljetusmatka on 300 m ja kaukokuljetusmatka 80 km.

Tuotantoyksiköiden työllistymisen kannalta on eduksi se, että niiden suorituskyvyt vastaavat toisiaan tai ovat kerrannollisia, tai että tuotantokalustoa voidaan käyttää polttoaineentuotannon lisäksi muihin tehtäviin. Tarkasteluissa ketjuissa erikoiskalustoa ovat välivarasto- ja palstahakkurit sekä hakkuutähdeautot. Kuormatraktoreilla voidaan kuljettaa hakkuutähdeksen lisäksi puutavaraa ja hakeautoja voidaan käyttää muuhunkin kuin polttohakkeen kuljetukseen. Periaatteessa niiden kapasiteetti on mahdollista hyödyntää täysimääräisesti. Hakkuutähdeauton käyttö muihin kuljetuksiin on rajoitettua. Koska siinä ei ole kuormanpurkulaitteita, se ei sovellu esimerkiksi hakkeen tai polttoturpeen kuljetukseen.

Tuotantoketjujen kehityspotentiaalia voidaan arvioida seuraavasti:

- tienvarsihaketuksessa uusimpien hakkureiden tuottavuus on suurempi ja se voi suurentaa ketjun vuosituotosta ja pienentää tuotantokustannuksia
- palstahakkurin syöttö on kehitettävä tehokkaammaksi; sillä on suuri vaikutus tuottavuuteen ja kustannuksiin
- paalauksen tuottavuus suurenee ja se voi pienentää tuotantokustannuksia jo lähitulevaisuudessa noin 10 mk/m<sup>3</sup>
- vaikka irtonaisen hakkuutähdeksen kuljetukseen perustuva ketju oli edullisin, tulee hakkuutähdeautoa kehittää siten, että hyötykuorma saadaan suuremmaksi.

### 3.8.2 Tuotantoketjujen päästöt

Tuotantoketjujen päästöt laskettiin tässä raportissa esitettyjen tuottavuuksien ja kustannuslaskelmissa käytettyjen poltto- ja voiteluainekulutuksien perusteella. Päästölaskelmiin sisällytettiin myös koneiden siirrot työmaalta toiselle sekä kuljettajien omien autojen käyttö työmatkoihin. Koneiden siirroista 65 % on oletettu tehtävän lavettiautolla ja loput koneilla ajamalla. Tämä perustuu metsäkoneiden siirroista oleviin tietoihin. Käyttöpaikallahaketuksen päästöt laskettiin sähkön kulutuksen perusteella.

Irtonaisen hakkuutähdeksen kuljetukseen ja haketukseen käyttöpaikalla perustuva ketju oli sekä polttoaineen käytöstä lasketun energiankulutuksen että päästöjen suhteen selvästi muita tuotantotapoja parempi (taulukko 12). Paalaukseen ja välivarastohaketukseen perustuvien tuotantoketjujen polttoainekulutukset olivat saman suuruiset, mutta paalauksen päästöt olivat pienemmät. Palstahaketuksessa polttoaineen kulutus ja päästöt olivat huomattavan suuret.

TAULUKKO 12 Hakkuutähdepolttoaineen tuotantoketjujen energiankulutus ja päästöt, kun metsäkuljetusmatka on 300 m ja kaukokuljetusmatka 80 km

Tuotantoketju	Energian-	Päästöt, g/m <sup>3</sup>					
	kulutus	HC	NOx	CO <sub>2</sub>	Hiuk-	SO <sub>2</sub>	CO
	MJ/m <sup>3</sup>				kaset		
Välivarastohaketus	219	18,3	250	16602	14,1	11,2	45,8
Palstahaketus	333	25,5	381	25302	20,5	17,1	64,6
Paalaus	220	15,4	234	16104	11,8	9,8	41,0
Irtotähde	204	9,3	219	14769	8,0	6,8	28,4

#### 4 TULOSTEN ARVIOINTI JA JATKOTUTKIMUSTEN TARVE

Puupolttoaineen tuotantoketjuista on melko vähän tutkimustuloksia. Alalle on tyypillistä voimakas kehitys. Usein koneet ja laitteet ovat olleet tutkimushetkellä uusia, jopa prototyyppiasteella. Tutkimukset on useimmiten tehty yksittäisistä koneista ja hankittu aineisto on jäänyt olosuhdekirjoltaan pieneksi. Näistä syistä julkaistut tulokset vanhenevat ja niiden soveltamisarvo heikkenee nopeasti. Esimerkiksi tässä raportissa käytetyt välivarastohaketuksen tiedot eivät aivan vastanne uusimpien työkonoiden tuottavuutta. Ne ovat kuitenkin lähes tulkoon ainoat välivarastohaketuksesta julkaistut tulokset ja voidaan olettaa, että niiden perusteet ja sovellettavuus tunnetaan.

Palstahaketusta tutkittiin kahdella hakkurilla. Tulokset osoittivat hakkurin syötön tehottomaksi. Se oli suurin syy palstahaketuksen pieneen tuottavuuteen ja suuriin kustannuksiin. Kuorman koon määrittäminen oli ongelmallista. Sillä on merkitystä irto-/kiintotilavuussuhteen lukuarvoon. Tutkimuksessa käytetty kiintotilavuuden määrittäminen oli ongelmallista ja tuottavuustulokset siltä osin luotettavia.

Nyt tutkittu oksapaalain oli ensimmäinen Suomessa käyttöön otettu kone ja muutenkin ensimmäisiä koneita. Sen alustakoneeksi oli valittu vanha hakkuukone, jonka valmistus oli lopetettu jo kauan sitten. Koneita voidaan pitää lähes prototyyppilaitteena. Seuraavat koneet on varustettu keskikokoisen kuormatraktorin alustalle, ja myöhemmin alustakone ja paalain sovitetaan yhteen perusteellisemmän suunnittelun perusteella. Paalauksen tuottavuus tulee paranemaan tässä tutkimuksessa todetusta. Sitä tukevat koneteknisen kehityksen lisäksi tutkimustulokset, jotka osoittavat tehottomuutta eräissä työvaiheissa.

Oksapaalien kuljetustehokkuuden arviointi edellyttää lisää ja seikkaperäisempää tarkastelua paalin optimikoon määrittämiseksi.

Irtonaisen hakkuutähteen kuljetukseen ja käyttöpaikallahaketukseen tai -murskaukseen perustuva tuotantoketju osoittautui edullisimmaksi puupolttoaineen tuotantotavaksi. Sen ongelmakohta on vielä kuitenkin kaukokuljetus, joka kaipaa kalustokehitystä kuorman hyötykuorman suurentamiseksi.

Murskaus ja haketus käyttöpaikalla on huomattavan edullista välivarasto- ja palstahaketukseen verrattuna. Kiinteiden asemien investointikustannukset ovat useita miljoonia, jopa 10 miljoonan luokkaa. Niiden suorituskyky on kuitenkin suuri, esimerkiksi 200 000 kiintokuutiosta vuodessa ylöspäin. Siten kiinteät asemat sopivat nimen omaan puupolttoaineen suuriin käyttöön.

Käyttöpaikallahaketusta on mahdollista soveltaa myös pienillä lämpö- ja voimalaitoksilla mobiilikaluston avulla. Tehokkaiden mobiilimurskainten ja autohakkureiden suorituskykyä voidaan hyödyntää tehokkaasti keskittämällä murskaus tai haketus käyttöpaikoille. Yhdenkin murskaimen tai hakkurin työllistäminen edellyttää usean käyttöpaikan yhteistyötä. Mobiilikalustolla voitaisiin käyttöpaikallahaketuksessa päästä esimerkiksi 100 000 - 150 000 kiintokuution vuosituotokseen ja 10 - 15 mk/m<sup>3</sup> tuotantokustannuksiin.

Hakkurin suorituskyky on selvästi suurempi kuin murskainten. Oksapaalien haketuksessa rumpuhakkurin tehoaikatuottavuus oli 167 m<sup>3</sup>/h kun se murskaimilla oli 74 - 117 m<sup>3</sup>/h. Hakkurin terät vaurioituvat helposti kivistä ja rautakappaleista, joita voi joutua silloin tällöin haketettavan materiaalin joukkoon. Siksi haketus- tai murskaustekniikka pitää valita ennen muuta murskattavan materiaalin perusteella. Jos haketetaan pelkästään hakkuutähdettä ja pienpuuta, niin leikkaavilla terillä varustettu hakkuri voi tulla kyseeseen, mutta rakennusjätepuu edellyttää murskaimen käyttöä.

Pitkäaikaista seuranta tarvitaan käytännössä toteutuvan suorituskyvyn selvittämiseksi. Seurantatutkimuksella voidaan saada tietoa myös työolosuhteista ja työn järjestelystä. Niitä ovat mm. tiedot työmääristä, työvuoroista, työmaiden koosta, siirtomatkoista ja -tavasta. Tässä tutkimuksessa tukeuduttiin hakkuukoneiden, kuormatraktoreiden ja puutavara-autojen tuottavuus- ja seurantatutkimuksista saatuihin tuloksiin.