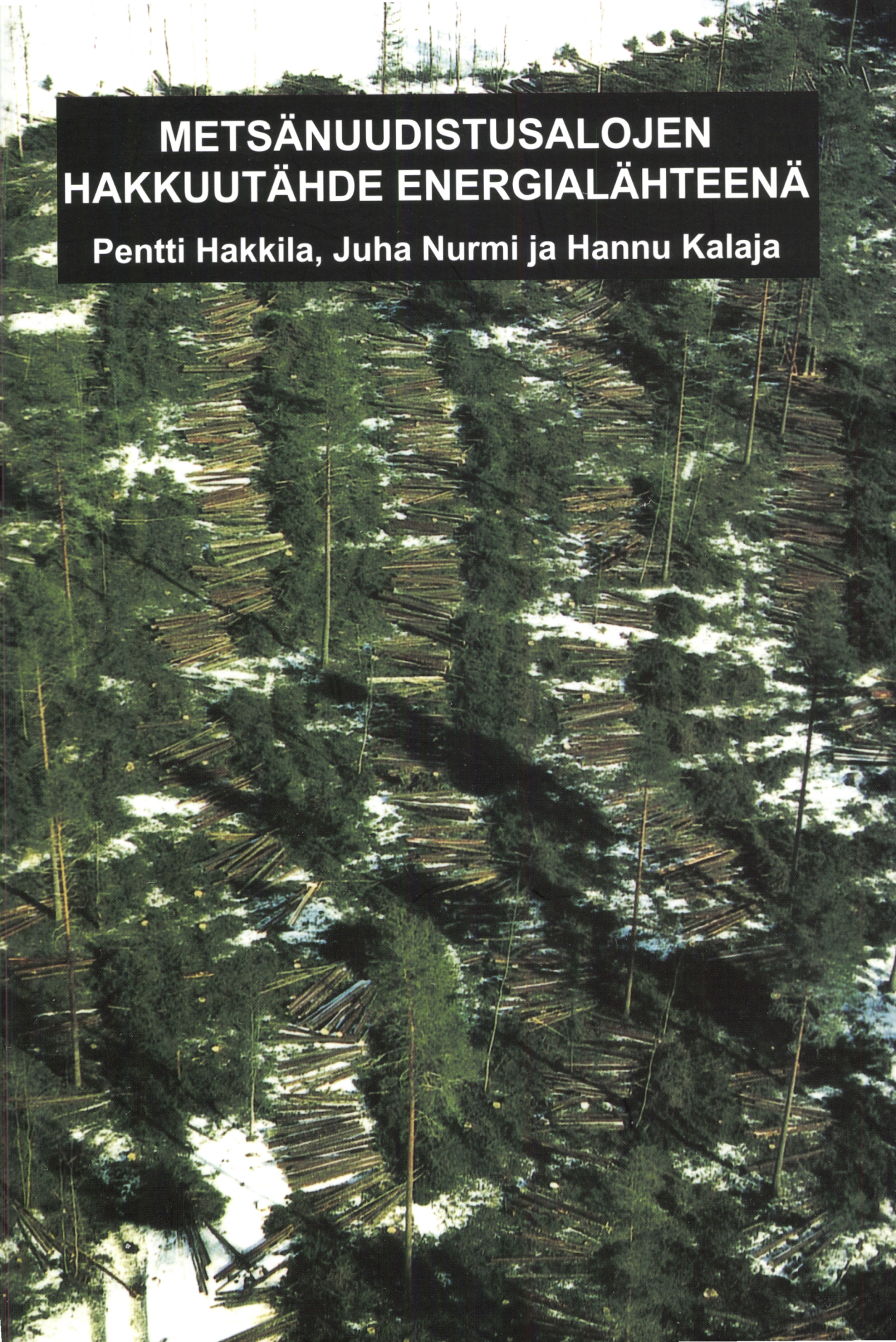
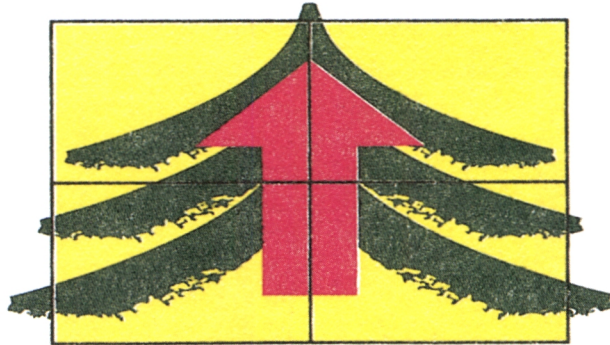


METSÄNUUDISTUSALOJEN HAKKUUTÄHDE ENERGIALÄHTEENÄ

Pentti Hakkila, Juha Nurmi ja Hannu Kalaja



Bioenergian tutkimusohjelma



METSÄNUUDISTUSALOJEN HAKKUUTÄHDE ENERGIALÄHTEENÄ

Pentti Hakkila, Juha Nurmi ja Hannu Kalaja

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684

Vantaan tutkimuskeskus – Kannuksen tutkimusasema
1998

Hakkila, P., Nurmi, J. ja Kalaja, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähde energialähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684. 68 s. ISBN 951-40-1624-6, ISSN 0358-4283.

Uudistusalojen hakkuutähde, joka koostuu pääasiassa latvusmassasta ja osaksi myös hukkarunkopuusta, on metsiemme merkittävin energioreservi. Teknisesti korjuukelpoisen hakkuutähteen määrä on neulasineen korjattaessa 8,6 milj. m³ tai neulasitta korjattaessa 5,6 milj. m³ vuodessa. Jos hakkuutähde ohjattaisiin energiakäyttöön korvaamaan fossiilipolttoaineita, maamme hiilidioksidipäästöt vähenisivät 1 %:lla kutakin miljoonaa kuutiometriä kohti. Hakkuutähdehakkeen käyttö oli vuonna 1997 kuitenkin vain vajaa 0,2 milj. m³.

Julkaisu on kooste hakkuutähteen mahdollisuuksista uudistuvan energian lähteenä. Siinä käsitellään hakkuutähteen määrää runko- ja leimikkokohtaisesti sekä valtakunnallisesti, hakkuutähteen polttoaineominaisuuksia, korjuutekniikkaa, kustannuksia sekä tähden talteenoton vaikutusta metsän uudistamiseen ja uuden puusukupolven kasvuun.

Avainsanat: hakkuutähde, biomassa, energia, polttopuu, korjuu, kustannukset, ympäristövaikutukset

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos. Hanke: 3137. Hyväksynyt: tutkimusjohtaja Matti Kärkkäinen 25.5.1998.

Kirjoittajien yhteystiedot: *Pentti Hakkila ja Hannu Kalaja:* Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa. Puh: (09) 857 051, Fax: (09) 8570 5361. *Juha Nurmi:* Metsäntutkimuslaitos, Kannuksen tutkimusasema, PL 44, 69101 Kannus. Puh: (06) 874 3211, Fax: (06) 874 3201.

Jakelu: Metsäntutkimuslaitos, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Puh: (09) 857 051, Fax: (09) 625 308.

Taitto: Maija Heino ja Essi Puranen

ISBN 951-40-1624-6

Gummerus Kirjapaino Oy
Jyväskylä 1998

Sisällysluettelo

| | Sivu |
|--|------|
| ESIPUHE..... | 4 |
| 1 TAUSTA | 5 |
| 1.1 Puuperäisen energian nykytila | 5 |
| 1.2 Metsähakkeen energiakäytön kantovoimat | 6 |
| 2 UUDISTUSALOJEN HAKKUUTÄHDE | 7 |
| 2.1 Hakkuutähteen käsite | 7 |
| 2.2 Hukkarunkopuu | 8 |
| 2.3 Runkokohtainen latvusmassa | 10 |
| 2.4 Leimikkokohtainen hakkuutähte | 13 |
| 2.5 Valtakunnallinen hakkuutähdearvio | 15 |
| 3 HAKKUUTÄHDE POLTTOAINEENA | 19 |
| 3.1 Hakkuutähteen polttoaineominaisuudet | 19 |
| 3.2 Hakkuutähteen lämpöarvo | 23 |
| 3.3 Varastointi ja kuivuminen | 24 |
| 4 HAKKUUTÄHTEEN TALTEENOTTO..... | 29 |
| 4.1 Hankinnan suunnittelu | 29 |
| 4.2 Tähteen kasaus hakkuukoneella | 30 |
| 4.3 Tähteen kuljetus tien varteen | 32 |
| 4.4 Tähteen hakettaminen | 38 |
| 4.5 Hakkeen autokuljetus | 42 |
| 4.6 Hakkuutähdehakkeen kustannukset | 44 |
| 4.7 Vaihtoehtoisia hankintajärjestelmiä | 47 |
| 5 TÄHTEEN TALTEENOTON SEURANNAISVAIKUTUKSET METSÄTALOUESSA | 53 |
| 5.1 Tähteen poistamisen vaikutus maan ravinnevaroihin | 53 |
| 5.2 Tähteen poistamisen vaikutus metsän uudistamisessa | 57 |
| 6 HAKKUUTÄHTEEN MAHDOLLISUUDET | 60 |
| LÄHDEKIRJALLISUUS..... | 65 |

Esipuhe

Hakkuutähteen hyödyntämiseen tähtäävä tutkimustoiminta käynnistyi vuonna 1969 yhteispohjoismaisella hankkeella, jonka johtajana toimi Metsäntutkimuslaitos. Neljän maan voimin tutkittiin hakkuutähteen biomassapotentiaalia, teknisiä ominaisuuksia, korjuumenetelmiä, soveltuvuutta sulfaattisellu-, lastulevy- ja kuitulevyteollisuuden raaka-aineeksi sekä tehostetun talteenoton seurannaisvaikutuksia. Samoihin aikoihin pohjoismainen metsäteollisuus selvitteli hakkuutähteen käyttömahdollisuuksia mittavien kansallisten konekehittely- ja tehdaskoeohjelmin. Vaikka tavoitteena olikin yksinomaan raaka-ainekäyttö, tuolloin hankittu tietopohja loi erinomaisen lähtökohdan myöhemmälle energiakäyttöön tähtäävälle tutkimukselle.

Energian lähteenä hakkuutähdettä ryhdyttiin tutkimaan vasta 1970-luvulla yleismaailmallisen energiakriisin jälkimainingeissa. Metsäntutkimuslaitos toteutti vuosina 1978–1985 ”Puu energian raaka-aineena” (PERA) hankkeen, mutta kun öljyn hinta laski, yhteiskunnan kiinnostus metsäenergiaan herpaantui. Vasta Bioenergian tutkimusohjelma, ensin VTT Energian ja sitten Jyväskylän Teknologikeskus Oy:n koordinoimana, loi vuodesta 1993 lähtien riittävät resurssit kansalliselle tutkimus-, kehitys- ja demonstraatio-ohjelmalle.

Metsäntutkimuslaitos toteutti vuosina 1993–1997 neljä Bioenergian tutkimusohjelman hanketta, jotka tähtäsivät hakkuutähteen energiakäyttöön: Energiapuun kertymä ja biomassatase (hanke 105); Päätehakkuualueiden hakkuutähte polttoaineena (hanke 114); Hakkuutähteen ja hakkuutähdihakkeen laatu (hanke 125); sekä Puupolttoaineen laadunvalvonta (hanke 125). Niihin ovat eri vaiheissa osallistuneet Metsäntutkimuslaitoksen Vantaan tutkimuskeskus ja Kannuksen tutkimusasema, VTT Energia, Joensuun yliopisto, Metsäteho Oy sekä käytännön kenttäkokeitten yhteistyökumppaneina Biowatti Oy, Enso Oy, UPM-Kymmene Oy, Pertti Szepaniak Oy, Walki Wisa sekä Mikkelin kaupunki. Käsillä oleva katsaus on kooste yllä mainitusta tutkimussarjasta, mutta sitä on täydennetty muissa tutkimuksissa kotimaassa ja ulkomailla saavutetuilla tuloksilla sekä työelämän kokemuksilla.

Kiitämme kaikkia työssä mukana olleita. Erityisesti haluamme mainita seuraavat henkilöt: erikoistutkija P.-J. Kuitto ja tutkija Ismo Nousiainen VTT Energiasta, vt. prof. Antti Asikainen, MMK Kalle Kärhä ja MMK Päivi Pulkkinen Joensuun yliopistosta, MML Antti Korpilahti Metsäteho Oy:stä, toimitusjohtaja Pekka Laurila Biowatti Oy:stä, puuhoiltopäällikkö Kari Kuvaja Enso Oy:stä, kehittämisspällikkö Timo Kalliola UPM Kymmene Oy:stä, toimitusjohtaja Pekka Szepaniak Pertti Szepaniak Oy:stä, toimitusjohtaja Pekka Lahti Kotimaiset Energiat Ky:stä, kehitysteknikko Henrik Lassfolk Walki Wisasta, metsätal. ins. Pekka Auvinen Mikkelin kaupungista sekä suunnittelija Hannu Aaltio, toimistos sihteeri Maija Heino, metsätalousinsinööri Pekka Helminen, tutkimussihteeri Pirkko Kinanen, tutkimusmestari Jaakko Miettinen, toimistovirkailija Essi Puranen, metsätalousteknikko Erkki Salo sekä tutkimusmetsuri Veijo Salo Metsäntutkimuslaitoksesta.

Vantaalla ja Kannuksessa, toukokuussa 1998

Pentti Hakkila

Juha Nurmi

Hannu Kalaja

1 Tausta

1.1 Puuperäisen energian nykytila

Maailmassa käytetään vuosittain 3,2 mrd m³ puuta: puolet teollisuuden raaka-aineeksi, puolet suoraan polttopuiksi. Raaka-ainekäyttö keskittyy teollisuusmaihin, energia- käyttö kehitysmaihin. Vuoteen 2010 mennessä vuosikäytön odotetaan nousevan 3.8 mrd:n m³:n tasolle, ja yhä edelleen puolet siitä tulee olemaan polttopuuta (FAO 1997).

Suomen metsistä korjataan kuorellista raakapuuta vuosittain noin 56 milj. m³. Siitä 5 milj. m³ ohjautuu välittömästi polttopuiksi. Tämä ensiasteinen polttopuu tuotetaan hajallaan pienerissä. Sen teolle ja käytölle on ominaista suuri ihmistyön panos, eikä se yleensä tule kaupallisen toiminnan piiriin. Käyttöäkään ei ole automatisoitu sillä tavoin kuin muilla polttoaineilla. Siksi puun polttoainekäytön ylle on langennut alikehittyneisyyden leima. Sitä on pidetty jopa kansantaloudellisena tuhlauksena.

Lähes kaikki muu puu, noin 50 milj. m³ vuodessa, jalostetaan teollisuudessa. Metsäteollisuuden koti- ja ulkomaisesta raakapuusta jää kuitenkin runsaasti prosessitähdettä: kuori, sahanpuru, muu puutähdte sekä sulfaattiselluteollisuuden ligniinipitoinen jäteliemi. Suomessa nämä tähteet, tai oikeammin sivutuotteet, hyödynnetään pääosin lopulta energian tuotannossa, mutta monissa maissa niitä yhä edelleen hävitetään polttamalla ja läjittämällä kaatopaikoille.

Puuperäisen biomassan ensi- ja toisasteinen käyttö polttoaineeksi on energia-arvoltaan kaikkiaan 55–60 TWh vuodessa. *Energiakäyttöön päätyy itse asiassa yli 40 % metsistämme korjatusta kuorellisesta runkopuusta*, mikä raakapuiksi muunnettuna vastaa yli 25 milj. m³ tai energiana yli 5 milj. öljytonnia vuodessa. Näin katetaan 18 % Suomen primaarienergian kokonaiskulutuksesta (Energiakatsaus 1998). Vain vähäinen osa prosessitähdestä päätyy vapaille markkinoille, sillä tuottaja käyttää sen ensisijaisesti omaan energiatuotantoonsa. Prosessitähdettä markkinoi lähinnä Biowatti Oy, jonka polttoainetoimitukset koostuvat pääasiassa metsäteollisuuden puu- ja kuoritähdestä mutta myös metsätähdestä.

Ruotsissa, missä energiapolitiikka ja -verotus on suunnattu tukemaan uusiutuvien energiavarojen käyttöönottoa ja puuperäisten polttoaineitten hintataso on siitä syystä korkeampi kuin meillä, teollisuus- ja metsätähdestä valmistettujen puupolttoaineitten kauppa on saavuttanut huomattavat mittasuhteet. Kauppa enemmän kuin kaksinkertaistui 1990-luvun alkupuoliskolla, ja puupolttoaineita alettiin tuoda ulkomailtakin. Vuonna 1995 kulki yksinomaan polttihaketta kaupan kautta 6,3 TWh:n edestä. Sen pääasiallinen lähde oli uudistusalojen tähde (Brunberg & Hillring 1996):

| Puupolttoaine | 1991 | 1995 |
|-----------------------------|------------------------------|------|
| | Ruotsin markkinat, TWh/vuosi | |
| Kuori ja puru | 2,6 | 9,9 |
| Hake | 3,8 | 6,3 |
| Kiinteät jalosteet | 0,7 | 2,6 |
| Markkinapolttoaine yhteensä | 7,1 | 18,8 |

Ennenkokematon työttömyys, fossiilipolttoaineitten rajallisuus ja yleismaailmallisten ympäristöuhkien kärjistyminen muovaavat asenteita puuperäiselle energialle myötämie-
lisiksi teollistuneessakin maailmassa. Puun energiakäytön tunnettuja etujahan ovat pai-
kallisuus, työllistävyys, uusiutuvuus, ympäristöystävällisyys sekä metsien hoitoon liit-
tyvät hyödyt. Siksi Suomessakin on hyväksytty yleiseksi tavoitteeksi saattaa hyödyn-
tämättä jäävä metsäbiomassa energian tuotantoon, kestävän metsätalouden periaatteesta
tiukasti kiinni pitäen. Samalla *metsäenergiasta on kehittymässä pohjoismaisen met-
säklusterin uusi osaamisen ala.*

1.2 Metsähakkeen energiakäytön kantovoimat

Vielä viime sotien kynnyksellä 80 % maamme primaarienergian kokonaiskulutuksesta
tydytettiin puuperäisellä energialla. Sotien aikana puun merkitys teollisuuden, koti-
talouksien ja liikenteen energialähteenä oli elintärkeä. Kun kehitys sitten kääntyi kohti
fossiilipolttoaineita ja ydinenergiaa, perinteisen polttopuun käyttö hiipui.

Yhteiskuntamme on aika ajoin havahtunut ponnistelemaan heikkolaatuisen puun polt-
toainekäytön puolesta. Näin tapahtui ensi kerran 1950-luvun lopulla, kun pienikokoi-
sen puun kehno menekki jarrutti nuorten metsien kunnostushakkuita ja järkiperaistä
metsänhoitoa. Ratkaisu menekkiongelmiaan löytyikin uusista teollisuustuotteista – las-
tulevyistä ja koivusellusta – ja pienpuuvuori alkoi purkaantua. Sen mukana kiinnos-
tus puun polttoainekäytön elvyttämiseen lopahti.

Polttopuukysymys tuli uudelleen ajankohtaiseksi 1970-luvulla. Kaksi peräkkäistä ener-
giakriisiä moninkertaisti silloin öljyn hinnan ja horjutti luottamusta öljyn saatavuuteen
maailmanmarkkinoilta. Kun polttoainehuollon keskeiseksi tavoitteeksi tuli omavarai-
suuden kohottaminen, katseet kohdistuivat puuhun ja turpeeseen. Painotuksen ja arvos-
tuksen muuttuminen heijastui käsitteistössäkkin, niin että puun sijasta alettiin puhua bio-
massasta, polttopuun sijasta energiapuusta ja ennen kaikkea energiaraaka-aineitten uu-
siutuvuudesta.

Mutta niin pian kuin kriisi väistyi, harrastus puuperäiseen polttoaineeseen herpaantui
jälleen. Ripeä kasvu sammui 1980-luvun puolivälissä, kun fossiilipolttoaineitten hin-
tapiikki katkesi. Jopa Puolustusvoimatkin, joka kriisiajan valmiutta ylläpitääkseen oli
pitkään pohjannut useitten varuskuntiensa lämmityksen hakkeeseen, vaihtoi hakkeen
öljyyn 1990-luvun koittaessa. Valtiovallan tavoite nostaa energiankäytön kotimaisuus-
astetta kyllä muodollisesti säilyi, mutta todellisuudessa kannettiin huolta pikemminkin
öljyntuonnin tason säilyttämisestä idänkaupassa kuin öljyn korvaamisesta kotimaisil-
la polttoaineilla.

Pienpuun menekin puutteessa nuorten metsien hoito takkuuntui jälleen 1990-luvun alus-
sa. Samaan aikaan haja-asutusalueitten työllisyys ja tulonmuodostus romahtivat. Ja en-
nen kaikkea, tiedostettiin fossiilipolttoaineista ilmakehään vapautuvien kasvihuonekaa-
sujen aiheuttaman ilmaston lämpenemisen ja äärevöitymisen pelottavat seurausvaiku-
tukset. Puuperäiset polttoaineet, tai laajemmin bioenergia, palasivat julkiseen keskus-
teluun ja poliittiseen päätöksentekoon.

Puubiomassan polttoainekäytön edut löydettiin uudelleen. Nähtiin, että hälyttävää kehitystä voidaan ainakin hidastaa korvaamalla fossiilipolttoaineita pien- ja jätetuusta tehdyllä hakkeella. Käänteentekevä muutos oli, että päinvastoin kuin aikaisemmin, *puun energiakäytön kantovoimat* eivät olleet enää suhdanteitten mukana ohimeneviä. *Niistä oli tullut sekä yleismaailmallisia että pysyviä.*

Kiinnostus metsiimme energialähteenä elpyi vasta 1990-luvun puolivälissä. Tällöin myös oivallettiin, että energiapuureservimme keskeinen osa koostuu uudistushakkuissa syntyvästä, jalostuskäyttöön kelvottomasta biomassatähteestä. Ainespuun korjuutekniikan kehittyminen, erityisesti *yksiotehakkuukoneitten voittokulku, avasi uusia mahdollisuuksia hakkuutähteen taloudelliselle talteenotolle.*

Tässä koosteessa tarkastellaan uudistusaloille jäävän biomassatähteen energiapotentiaalia, polttoaineominaisuuksia, korjuuta, varastointia, kustannuksia sekä talteenoton metsätaloudellisia seurannaisvaikutuksia. Katsaus on tarkoitettu virikkeeksi ja taustaineistoksi metsä- ja energia-alan ammattihenkilöille, koneyrittäjille ja päätöksentekijöille. Lähtökohtana on, että uusiutuvan *energian tuotanto integroituu tulevaisuudessa metsätalouden yleiseen suunnitteluun*, korjuun logistiikkaan, puunhankinnan laatujärjestelmiin ja *lopulta metsätalouden sertifiointimenettelyyn.*

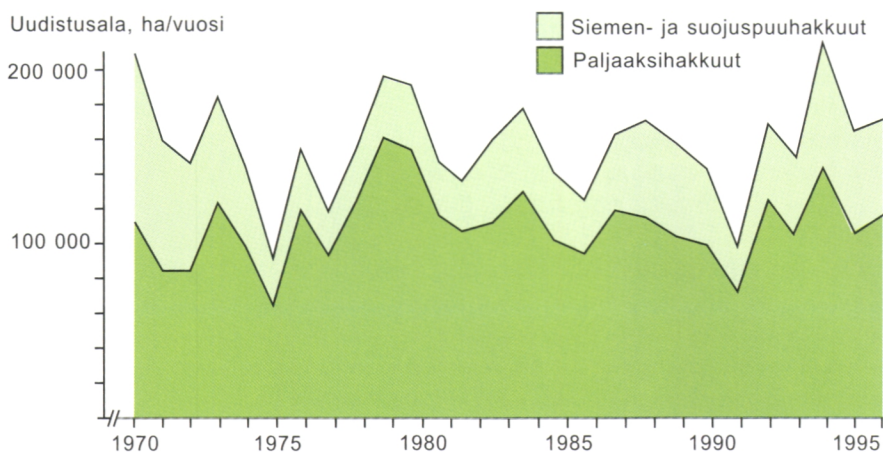
2 Uudistusalojen hakkuutähde

2.1 Hakkuutähteen käsite

Suomalainen metsänhoito perustuu toistuviin alaharvennuksiin, joilla ohjataan puuston kehittymistä haluttuun suuntaan. Metsikön kasvatus päättyy uudistushakkuuseen, jossa korjataan suurin ja arvokkain osa kiertoajan puusadosta. Samalla käynnistyy uuden puusukupolven perustaminen. Jos turvaututaan luontaiseen uudistamiseen, jätetään hehtaaria kohti männiköihin 50–100 siemenpuuta ja kuusikoihin 150–300 suojuspuuta, joitten kaikkien ei tule olla kuusia. Jos käytetään keinollista uudistamista, metsikkö hakataan paljaaksi, sillä siemen- tai suojuspuuta ei tarvita. Metsän monimuotoisuutta kuitenkin vaalitaan jätöpuilla, joitten määräksi suositellaan vähintään 5 m³ hehtaarilla.

Uudistushakkuu toteutetaan Etelä-Suomessa yleensä 80–100 vuoden ja Pohjois-Suomessa 100–120 vuoden iällä. Uudistushakkuuleimikot ovat teollisuudelle harvennusleimikoita mieluisampia, sillä niistä saadaan järeätä puutavaraa ja koneellistaminen on ongelmatonta. Hakkuun koneellistamisaste on uudistushakkuissa lähes 100 %.

Uudistushakkuitten pinta-ala on vuosittain keskimäärin 150 000 ha, mutta sahateollisuuden matalasuhdanteessa se voi jäädä poikkeuksellisesti jopa alle 100 000 ha:n. Noin 70 % alasta on keinolliseen uudistamiseen tähtäävää paljaaksihakkuuta ja 30 % luontaiseen uudistamiseen tähtäävää siemenpuu- tai suojuspuuhakkuuta (kuva 1).



Kuva 1. Uudistushakkuitten pinta-ala vuodesta 1970 lähtien (Metsätilastollinen vuosikirja 1997).

Jos poistettava puusto on pienikokoista kuten esimerkiksi ensiharvennuksissa, hakkuualalle jää runsaasti raaka-aineeksi soveltumatonta runkopuuta. Uudistushakkuissa runkopuuta tuhlaantuu suhteellisesti vähemmän, koska puusto on järeätä. Mutta kun poistuma pinta-alayksikköä kohti on kuitenkin suuri, uudistusaloillekin pyrkii jäämään merkittäviä määriä runkopuuta. Tämä hukkarunkopuu ei täytä kuitupuun laatuvaatimuksia, mutta se on täysin kelvollista energian tuotantoon. Energiapotentiaaliltaan hukkarunkopuuta paljon tärkeämpi on kuitenkin elävistä ja kuolleista oksista koostuva latvusmassa lehdet ja neulaset mukaan luettuina. Myös se soveltuu ominaisuuksiensa puolesta mainiosti energian tuotantoon. *Hakkuualalle jäävää hukkarunkopuuta ja latvusmassaa kutsutaan yhteisnimityksellä hakkuutähteeksi.*

2.2 Hukkarunkopuu

Kansainvälisesti tarkasteltuna kuitupuun vähimmäisläpimitta oli Suomessa aikaisemmin alhainen. Tällä vuosikymmenellä vähimmäisläpimittaa on Suomessa nostettu, monissa muissa maissa taas alennettu. Meillä se on nyt männyllä 7 cm, kuusella 8 cm ja koivulla 6 tai 7 cm. Koska pölkylä on myös tietyt pituusvaatimukset, latvan katkaisuläpimitta ei useinkaan satu rungossa vähimmäisläpimitan kohdalle vaan on todellisudessa keskimäärin 1 cm:n paksumpi. Jos pölkylä vaaditaan katkottaviksi tasametreille, kuten esimerkiksi eräitten hiomajen prosessitekniikka yhä edellyttää, latvapuuta hukkaantuu tavallista runsaammin.

Hukkarunkopuuta syntyy alamittaisuuden lisäksi myös muista syistä. Erityisesti vanhoissa kuusikoissa saattaa esiintyä lahovaurioita, jotka lisäävät tähteen määrää. Hukkarunkopuun lähteitä ovat:

Alamittaiset latvat. Määrä on suurin ensiharvennusleimikoissa, koska poistettavien puitten runkoluku on niissä korkein ja latvat solakoita, pitkään juoksevia. Määrä on kuitenkin merkittävä myös uudistusleimikoissa. Järeissä puissa latvan katkaisuläpimitta jää oksaisuudesta ja jyrkästä kapenemisesta johtuen erityisesti metsurileimikoissa paksummaksi kuin nuorissa puustoissa.

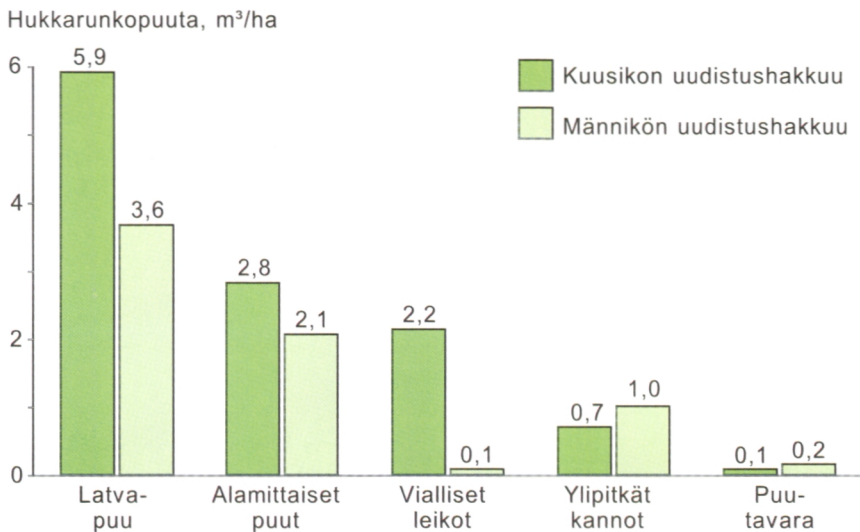
Alamittaiset rungot, jotka eivät täytä puutavaran mittavaatimuksia mutta eivät toisaalta ole metsähoidollisesti kasvatuskelpoisia. Osa niistä jää pystyyn, osa raivataan tai murskaantuu koneitten tai järeämpien puitten alle. Määrä vaihtelee leimikoittain metsikön aikaisemmista harvennuskäsittelyistä riippuen. Hoidetuissa metsissä alamittaisia runkoja on päätehakkuuvaiheessa yleensä niukalti.

Vialliset rungonosat, jotka lahon, mutkan, lenkouden, haaran tai repeämän vuoksi poistetaan ainespuun joukosta. Viallisena hylättäviä leikkoja jää runsaimmin uudistusleimikoihin, erityisesti kuusikoihin, sillä vanhoissa metsissä on lahovikaisuutta, ja hylkykappaleita joudutaan tekemään nimenomaan järeitä puita tukeiksi apteerattaessa. Hylkyleikot ovat paksuja ja lyhyitä, minkä vuoksi niitä saattaa olla vaikea hakettaa.

Ylikorkeat kannot, milloin kaatoleikkauksessa jää kelvollista puuta ylimmän katkaisua haittaavan juurenniskan yläpuolelle. Määrä riippuu hakkuukoneen kaatolaitteen rakenteesta, kaatoa haittaavista kivistä, lumioloista ja tyvilaaajeneman voimakkuudesta. Se on muuhun hukkarunkopuuhun verrattuna yleensä vaatimaton mutta saattaa nousta suureksi korkean hangen aikana työskenneltäessä. Koska kantopuun talteenotto on kuitenkin käytännössä mahdotonta, sitä ei tässä yhteydessä lueta miltään osin hakkuutähteeseen.

Valmis puutavara, jota jää metsäkuljetusvaiheessa vahingossa korjaamatta. Syynä on useimmiten puutavaran peittyminen lumeen. Määrä on nykyisin pieni, sillä hakkuukoneet jättävät puutavaran hyvin näkyville kasoille, ja lumisateitten aiheuttamat ongelmat ovat lientyneet korjuurytmin nopeutumisen myötä.

Metsäntutkimuslaitos mittasi vuosina 1997 ja 1998 hukkarunkopuun määrän 63 leimikosta Etelä-Suomessa. Sekä määrällisesti että suhteellisesti hukkarunkopuuta oli kuuksella enemmän kuin männyllä ja nuorissa metsissä enemmän kuin varttuneissa:



Kuva 2. Uudistushakkuissa tähteeksi jäävä hukkarunkopuu Etelä-Suomessa.

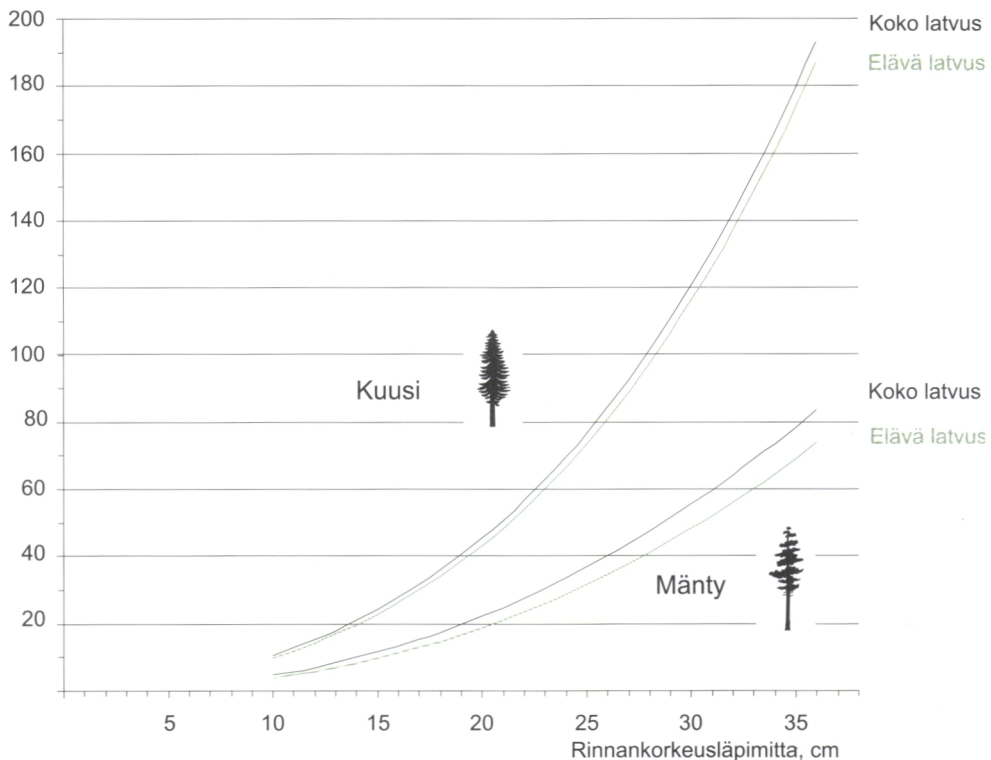
| | Männiköt | | Kuusikot | |
|------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------|
| | m ³ /ha | Hukkarunkopuu % | m ³ /ha | % |
| Ensiharvennusleimikot | 14,3 | 23,0 | 21,4 | 27,5 |
| Muut harvennusleimikot | 5,9 | 10,5 | 16,0 | 15,9 |
| Uudistusleimikot | 7,0 | 4,3 | 11,7 | 4,8 |

Uudistusalalle jää tähdettä luonnollisesti sitä enemmän, mitä puisevampi leimikko on kysymyksessä. Keskimäärin hukkarunkopuuta jäi uudistusalaille kuusikoissa 12 m³/ha ja männiköissä 7 m³/ha (kuva 2). Yli puolet oli peräisin latvoista ja muu osa lähinnä almittaisista rungoista ja viallisista rungonosista, joitten kummankin määrä vaihtelee leimikoittain laajoissa rajoissa.

2.3 Runkokohtainen latvusmassa

Latvusmassaan luetaan puun elävät ja kuolleet oksat lehtineen ja neulasineen. Koska latvusmassa koostuu vaihtelevin osuuksin puu-, kuori- ja viheraineesta, jotka kuiva-tuoretiheydensä suhteen poikkeavat suuresti toisistaan, määrä tulee ilmaista mieluummin massana kuin tilavuutena. Koska latvusmassan kosteus vaihtelee sääoloista ja varastoinnista riippuen, kuivamassa on käsitteenä tuoremassaa vakaampi. Siksi seuraavassa tarkastellaan nimenomaan kuivamassaa.

Kuivamassa, kg/puu



Kuva 3. Männyn ja kuusen elävän latvuksen ja koko latvuksen kuivamassa puun rinnankorkeusläpimitasta riippuen (Hakkila 1991).

Pääpuulajeistamme latvusmassaa on ylivoimaisesti eniten kuusella. Männylläkin sitä on yleensä hieman enemmän kuin koivulla, varsinkin kun koivu on suuren osan vuodesta lehdetön. Järeillä vahvaoksisilla koivuilla saattaa kuitenkin olla enemmän latvusmassaa kuin samankokoisilla männyillä. Käytännössä saavutetaan tyydyttävä tarkkuus, jos havupuitten seassa kasvavien vähälukuisten koivujen latvusmassa arvioidaan samaksi kuin männyllä.

Latvuksen massa kasvaa puun koon myötä, neulaskertain vaihtumisesta ja alaoksien karsiutumisesta johtuen tosin hitaammin kuin rungon massa. Runkokohtaista latvusmassaa voidaan siis ennustaa rungon kokoa kuvaavilla tunnuksilla. Tehokkain selittäjä on puun rinnankorkeusläpimitta (kuva 3):

| | | | Selitysaste % | Jäännös- hajonta, kg tai ln kg |
|-------------------------------------|-----------|---|------------------|--------------------------------------|
| <i>Elävän latvuksen kuivamassa:</i> | | | | |
| Mänty: | $\ln y =$ | $-9,3954 + 2,3268 \ln D$ | 88 | 0,427 |
| Kuusi: | $y =$ | $-3,71 + 0,10229 D + 3,30 \cdot 10^{-6} D^3$ | 88 | 11,7 |
| Koivu: | $\ln y =$ | $-10,7699 + 2,6016 \ln D$ | 84 | 0,451 |
| <i>Koko latvuksen kuivamassa:</i> | | | | |
| Mänty: | $\ln y =$ | $-8,8027 + 2,2475 \ln D$ | 91 | 0,358 |
| Kuusi: | $y =$ | $-4,34 + 0,11571 D + 3,34 \cdot 10^{-6} D^3$ | 89 | 11,5 |
| Koivu: | $\ln y =$ | $-10,2692 + 2,5124 \ln D$ | 84 | 0,436 |
| y | = | latvuksen kuivamassa, kg | | |
| $\ln y$ | = | latvuksen kuivamassan (kg) luonnollinen logaritmi | | |
| D | = | puun rinnankorkeusläpimitta, mm | | |
| H | = | puun pituus, dm | | |

Puun rinnankorkeusläpimittaan perustuva latvusmassa-arvio jää kuitenkin yksityistapauksissa kovin epävarmaksi, sillä oksaisuudessa voi kasvuolosuhteista riippuen olla suuriakin eroja. Erityisen suuri vaikutus on metsikön kasvatustiheydellä, niin että latvusmassaa on suhteellisesti sitä enemmän, mitä väljemmässä tilassa puut ovat kasvaneet. Kasvatusasento vaikuttaa paitsi latvusmassan määrään myös rungon solakkuuteen. Arviota voidaan siksi tarkentaa käyttämällä tätä rinnakkaisuutta välillisesti hyväksi ja lisäämällä yhtälöön puun pituus (H):

| | | | Selitysaste % | Jäännös- hajonta, kg tai ln kg |
|-------------------------------------|-----------|--|------------------|--------------------------------------|
| <i>Elävän latvuksen kuivamassa:</i> | | | | |
| Mänty: | $\ln y =$ | $-5,2678 + 3,4914 \ln D - 1,9498 \ln H$ $- 47,454 D/H^2$ | 91 | 0,377 |
| Kuusi: | $y =$ | $0,4112 + 0,00026724 D^2 + 1,41 \cdot 10^{-6} D^3$ $+ 0,00043562 D^3/H$ | 89 | 11,1 |
| <i>Koko latvuksen kuivamassa:</i> | | | | |
| Mänty: | $\ln y =$ | $-9,7486 + 0,0016023 D + 2,5600 \ln D$ $- 0,0063173 H$ | 93 | 0,318 |
| Kuusi: | $y =$ | $0,4866 + 0,00035026 D^2 + 1,35 \cdot 10^{-6} D^3$ $+ 0,00042424 D^3/H$ | 90 | 10,9 |

Kun kasvutila ahtaantuu, latvuksen alaosa jää varjoon ja alkaa valon puutteessa supistua. Valoa tavoitellessaan puu jouduttaa pituuskasvuun paksuuskasvun kustannuksella, ja runko solakoituu. Siksi latvusmassaa on runsaimmin nopeasti kapenevissa tyvekkäissä rungoissa ja niukkimmin pitkissä solakoissa rungoissa. Tiheässä kasvaneille rungoille on latvusmassan niukkuuden lisäksi ominaista, että keskimääräistä suurempi osa latvusmassasta koostuu kuolleista oksista. Tämä puolestaan merkitsee alhaisempaa neulasosuutta ja kosteutta.

Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty männyn ja kuusen *elävä latvusmassa* (elävät oksat neulasineen) ja *koko latvusmassa* (elävien oksien lisäksi myös kuolleet oksat) puun rinnankorkeusläpimitasta ja pituudesta riippuen. Taulukot osoittavat, että:

- kuusen latvusmassa on kaksinkertainen rinnankorkeusläpimitaltaan ja pituudeltaan samankokoiseen mäntyyn verrattuna
- mitä solakampia puut ovat, sitä pienempi on latvusmassan määrä. Ilmiö on männyllä jyrkempi kuin kuusella
- kuolleista oksista kertyvä lisämassa on männyllä suurempi kuin kuusella

Taulukko 1. Harvennus- ja uudistushakkuissa poistettavien mäntyjen latvusmassa rungon rinnankorkeusläpimitasta (D) ja pituudesta riippuen (Hakkila 1991).

| D cm | Puun pituus, m | | | | | | | | | | |
|---------|---|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 |
| | Männyn elävän latvuksen kuivamassa, kg | | | | | | | | | | |
| 10 | 4,6 | 3,9 | 3,2 | | | | | | | | |
| 12 | 7,5 | 6,7 | 5,6 | 4,6 | | | | | | | |
| 14 | | 10,4 | 8,9 | 7,5 | 6,2 | | | | | | |
| 16 | | 15,1 | 13,3 | 11,4 | 9,6 | 8,1 | | | | | |
| 18 | | | 18,8 | 16,3 | 13,9 | 11,9 | 10,2 | | | | |
| 20 | | | 25,5 | 22,5 | 19,4 | 16,7 | 14,3 | 12,4 | | | |
| 22 | | | | 29,8 | 26,1 | 22,6 | 19,5 | 17,0 | | | |
| 24 | | | | 38,5 | 34,0 | 29,7 | 25,8 | 22,5 | 19,8 | | |
| 26 | | | | | 43,4 | 38,1 | 33,4 | 29,2 | 25,7 | | |
| 28 | | | | | 54,1 | 48,0 | 42,2 | 37,1 | 32,7 | | |
| 30 | | | | | | 59,3 | 52,5 | 46,3 | 41,0 | 36,4 | |
| 32 | | | | | | 72,1 | 64,2 | 56,9 | 50,5 | 44,9 | |
| 34 | | | | | | | 77,4 | 69,0 | 61,4 | 54,7 | |
| 36 | | | | | | | | 82,6 | 73,7 | 65,9 | 59,1 |
| | Männyn koko latvuksen kuivamassa, kg | | | | | | | | | | |
| 10 | 5,5 | 4,8 | 4,2 | | | | | | | | |
| 12 | 9,0 | 7,9 | 7,0 | 6,1 | | | | | | | |
| 14 | | 12,1 | 10,7 | 9,4 | 8,3 | | | | | | |
| 16 | | 17,6 | 15,5 | 13,7 | 12,1 | 10,6 | | | | | |
| 18 | | | 21,7 | 19,1 | 16,8 | 14,8 | 13,1 | | | | |
| 20 | | | 29,3 | 25,8 | 22,8 | 20,1 | 17,7 | 15,6 | | | |
| 22 | | | | 34,0 | 30,0 | 26,4 | 23,3 | 20,5 | | | |
| 24 | | | | | 38,7 | 34,1 | 30,1 | 26,5 | 23,3 | | |
| 26 | | | | | 49,0 | 43,2 | 38,1 | 33,6 | 29,6 | | |
| 28 | | | | | 61,2 | 54,0 | 47,5 | 41,9 | 36,9 | | |
| 30 | | | | | | 66,5 | 58,6 | 51,6 | 45,5 | 40,1 | |
| 32 | | | | | | 81,0 | 71,4 | 62,9 | 55,4 | 48,8 | |
| 34 | | | | | | | 86,0 | 75,8 | 66,8 | 58,9 | |
| 36 | | | | | | | | 102,9 | 90,6 | 49,9 | 62,0 |

Taulukko 2. Harvennus- ja uudistushakkuissa poistettavien kuusien latvusmassa rungon rinnankorkeusläpimitasta ja pituudesta riippuen (Hakkila 1991).

| D cm | Puun pituus, m | | | | | | | | | | |
|---------|---|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 |
| | Kuusen elävän latvuksen kuivamassa, kg | | | | | | | | | | |
| 10 | 9,9 | 8,9 | 8,1 | | | | | | | | |
| 12 | 16,1 | 14,2 | 13,0 | 12,1 | | | | | | | |
| 14 | | 21,5 | 19,5 | 18,1 | 17,0 | | | | | | |
| 16 | | 30,9 | 27,9 | 25,8 | 24,2 | 22,9 | | | | | |
| 18 | | | 38,5 | 35,4 | 33,2 | 31,4 | 30,0 | | | | |
| 20 | | | 51,4 | 47,3 | 44,2 | 41,7 | 39,8 | 38,2 | | | |
| 22 | | | | 61,5 | 57,4 | 54,1 | 51,6 | 49,4 | | | |
| 24 | | | | 78,3 | 72,9 | 68,8 | 65,4 | 62,7 | 60,4 | | |
| 26 | | | | | 91,1 | 85,8 | 81,5 | 78,1 | 75,2 | | |
| 28 | | | | | 112,1 | 105,4 | 100,1 | 95,8 | 92,2 | | |
| 30 | | | | | | 127,9 | 121,3 | 116,0 | 111,5 | 107,8 | |
| 32 | | | | | | 153,3 | 145,4 | 138,9 | 133,5 | 128,9 | |
| 34 | | | | | | | 172,3 | 164,6 | 158,1 | 152,6 | |
| 36 | | | | | | | 202,5 | 193,2 | 185,5 | 179,0 | 173,4 |
| | Kuusen koko latvuksen kuivamassa, kg | | | | | | | | | | |
| 10 | 10,6 | 9,6 | 8,9 | | | | | | | | |
| 12 | 17,0 | 15,2 | 14,0 | 13,1 | | | | | | | |
| 14 | | 22,7 | 20,8 | 19,4 | 18,3 | | | | | | |
| 16 | | 32,4 | 29,5 | 27,4 | 25,8 | 24,6 | | | | | |
| 18 | | | 40,3 | 37,4 | 35,2 | 33,5 | 32,1 | | | | |
| 20 | | | 53,6 | 49,5 | 46,5 | 44,2 | 42,3 | 40,7 | | | |
| 22 | | | | 64,1 | 60,1 | 56,9 | 54,4 | 52,4 | | | |
| 24 | | | | 81,2 | 76,0 | 71,9 | 68,7 | 66,0 | 63,8 | | |
| 26 | | | | | 94,5 | 89,3 | 85,2 | 81,8 | 79,0 | | |
| 28 | | | | | 115,8 | 109,3 | 104,2 | 99,9 | 96,4 | | |
| 30 | | | | | | 132,1 | 125,7 | 120,5 | 116,2 | 112,5 | |
| 32 | | | | | | 157,8 | 150,1 | 143,8 | 138,5 | 134,1 | |
| 34 | | | | | | | 177,4 | 169,8 | 163,5 | 158,2 | |
| 36 | | | | | | | 207,8 | 198,8 | 191,3 | 185,0 | 179,6 |

Latvussuhde osoittaa puun elävän latvuksen pituuden ja rungon koko pituuden suhteen. Uudistushakkuissa männyn latvussuhde on tyypillisesti noin 50 % ja kuusen 70 %, pohjoisessa kummallakin puulajilla harvan kasvatusasennon johdosta yleensä pitempi kuin etelässä. Runkokohtaisen latvusmassa-arvion tarkkuutta voidaan hieman parantaa, jos myös latvussuhde tunnetaan. Leimikkosuunnittelussa ja hakkuukone-mittauksessa tätä tietoa ei kuitenkaan saada, eikä sitä kannata erikseen kerätä.

2.4 Leimikkokohtainen hakkuutähde

Hankinnan suunnittelu edellyttää arviota tähteen määrästä. Mukaan luetaan sekä hukkarunkopuu että latvusmassa. Luvussa 2.3 on esitetty yhtälöt, joilla latvusmassan määrä voidaan arvioida, kun leimikosta tunnetaan rinnankorkeusläpimitaan perustuva runkolukusarja sekä mieluusti myös puun pituus. Arviointitehtävä saattaisi olla *yhdistettävissä hakkuukonemittaukseen*, jolloin runkopuutavaran mittaustietojen ohella tulostuisi myös hakkuutähdearvio. Koneen tunnistamia laskentatekijöitä olisivat esimerkiksi rungon rinnankorkeusläpimita, rungon pituus esimerkiksi 10 cm:n läpimitaan asti, rungon kapeneminen sekä latvan katkaisuläpimita. Kuljettajan tehtävänä olisi syöttää tiedostoon leimikkokohtainen lisäarvio muusta hukkarunkopuusta kuin latvoista.

Taulukko 3. Hakkuutähteen (latvusmassa ja latvan hukkapuu) kuivamassa runkopuukertymän kuutiometriä kohti poistettavan puuston latvussuhteesta riippuen Etelä- ja Pohjois-Suomen uudistushakkuualoilla.

| Leimikkotyyppi | Poistettavan puuston latvussuhde, % | | | | |
|---------------------------|--|-----|-----|-----|-----|
| | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 |
| | Tähteen kuivamassa, kg/m ³ runkopuuta | | | | |
| Männiköt Etelä-Suomessa | 76 | 101 | 126 | | |
| Männiköt Pohjois-Suomessa | 82 | 107 | 132 | | |
| Kuusikot Etelä-Suomessa | | | 115 | 155 | 195 |
| Kuusikot Pohjois-Suomessa | | | 155 | 195 | 235 |

Kun hakkuukonemittaus ei tällaista arviota kuitenkaan vielä toistaiseksi tuota, on tyydyttävä runkopuun kertymään perustuvaan suhdearvioon. Runkopuuhun suhteutettuna latvusmassaa on siis eniten voimakkaasti kapenevassa lyhytvartisessa puustossa, jossa oksat ovat tyypillisesti paksuja ja elävä latvus peittää suuren osan rungosta. Vastaavasti latvusmassaa on vähemmän pitkässä solakassa puustossa, jonka elävä latvus on ränsistynyt.

Latvan hukkarunkopuu mukaan lukien tähdettä jää runkopuun kuutiometriä kohti männikössä keskimäärin noin 100 kg ja kuusikossa 150–200 kg (taulukko 3) ja hehtaaria kohti yleensä vastaavasti 15–30 ja 20–60 tonnia kuivamassaa. Mitä suurempi poistettavan puuston latvussuhde on, sitä enemmän tätä tähdettä syntyy. Kun latvussuhde muuttuu yhden prosenttiyksikön verran, tähteen kuivamassa muuttuu vastaavasti männikössä 2,5 ja kuusikossa 4,0 kg runkopuukertymän kuutiometriä kohti laskettuna.

Jos kuivamassan sijasta halutaan tietää tuoremassa kaatohekellä, muuntotehtävään käytetään luvussa 3.3 esitettyjä kosteusarvoja. Kaatohekellä tuoremassa on kuivamassaan verrattuna yli kaksinkertainen. Mikäli tähteen kosteudessa on kuivumisen seurauksena tapahtunut muutoksia, ne on tietenkin otettava huomioon.

Kuva 4 osoittaa suuntaa-antavasti tähteen koostumuksen. Voidaan tehdä seuraavia johdopäätöksiä:

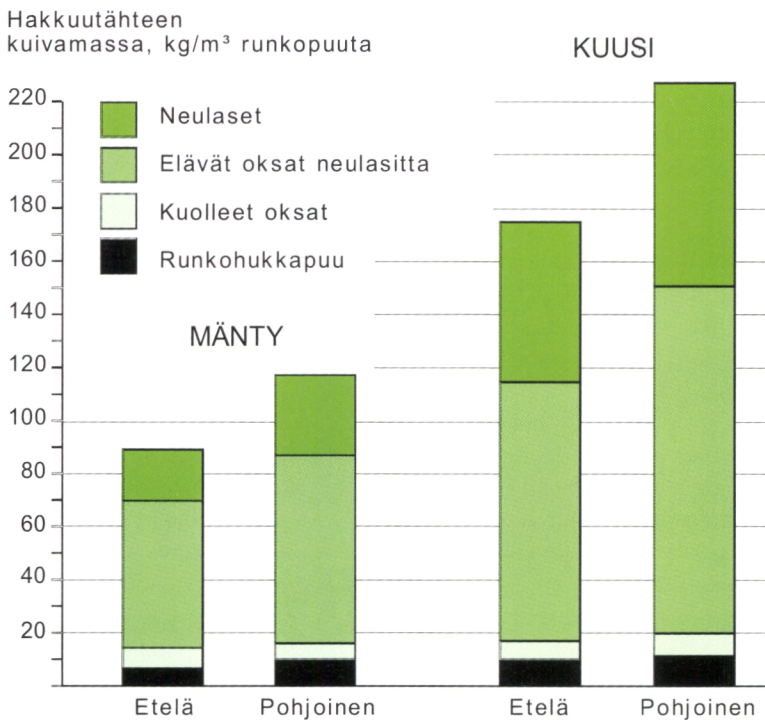
- *Hukkarunkopuun* osuus kaikesta tähteestä on uudistushakkuissa yleensä 4–8 %. Se vaihtelee metsikön kehityshistoriasta ja terveydentilasta, aikaisemmista harvennuskäsittelyistä, puuston järeydestä, puutavaran laatuvaatimuksista ja korjuun huolellisuudesta riippuen. Hukkarunkopuuta on kuusella enemmän kuin männyllä.
- *Elävien oksien* osuus on neulasen mukaan luettuina 85–90 % kaikesta hakkuutähteestä.
- *Pelkkien neulasten* osuus on männyllä 20–25 % ja kuusella 25–35 % kaikesta hakkuutähteestä. Kun neulasia hakkuutähteen kuivuessa varisee pois, biomassakertymä hupenee ja sen varastoimis- ja polttoaineominaisuudet muuttuvat monessa suhteessa.
- *Kuolleitten oksien* osuus on uudistushakkuissa 3–9 %, valoa vaativalla männyllä enemmän kuin varjoa sietävällä kuusella. Kuolleitten oksien talteenotto ei

tule kysymykseen metsurihakuussa, kun tähteet jäävät levälleen. Koneellisessa hakuussa myös kuivat oksat kerääntyvät kasoihin muun tähteen muassa. Ne alentavat tähteen keskimääräistä kosteutta mutteivät toisaalta juurikaan aiheuta metsämaalle ravinnetappiota.

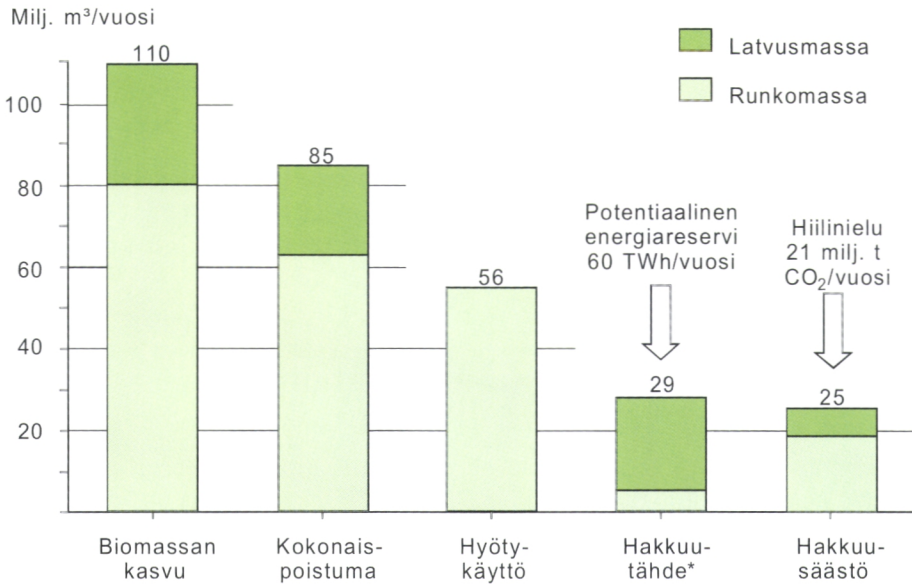
- *Pohjois-Suomessa* hakkuutähdettä jää runkopuukertymään suhteutettuna enemmän kuin Etelä-Suomessa. Kun pinta-alakohtainen kertymä on Etelä-Suomessa kuitenkin paljon suurempi, myös tähdettä jää etelässä tosiasiallisesti paljon enemmän.

2.5 Valtakunnallinen hakkuutähdearvio

Metsissämme vielä käytön ulkopuolella olevat biomassareservit voidaan jakaa kahteen luokkaan: hakkuusäästö ja hakkuutähde. *Hakkuusäästöä* pääosa on ainespuuta tai sijaitsee suojeltavissa kohteissa, joten vain vähäinen osa siitä on luokiteltavissa potentiaaliseksi energioreserviksi. Sellaista on kuitenkin kuidutukseen kelvoton puusto, jota metsänhoidollisista syistä tulisi harventaa nuorista metsistä nykyistä enemmän mutta jonka hyödyntämistä vaikeuttaa pieni läpimitta. *Hakkuutähde* kuuluu kokonaisuudessaan potentiaaliseen energioreserviin, koska se ei kelpaa teollisuuden raaka-aineeksi miltään osin.



Kuva 4. Etelä- ja Pohjois-Suomen päätehakuualoille keskimääräisissä oloissa jäävän hakkuutähteen kuivamassa suhteessa ainespuun kertymään (kg/m³) (Hakkila 1991).



Kuva 5. Metsiemme puuston biomassakasvu, poistuma ja hyötykäyttö vuonna 1994 (Hakkila & Fredriksson 1996). *Hakkuutähde sisältää luonnonpoistuman.

Suomen metsät tuottavat runkopuuta ja latvusmassaa vuosittain yhteensä 110 milj. m³, josta poistuman osuus on 85 milj. m³. Loppuosa eli 25 milj. m³ jää hakkuusäästönä kartuttamaan puustopääomaa ja toimii samalla hiilinieluna (kuva 5). Puustoon näin sitoutuva hiili kompensoi 30 % teollisuudessa, lämmityksessä ja liikenteessä ilmakehään vapautuvista hiilen nettopäästöistä (vrt. Hiilidioksiditoimikunta...1994).

Vuotuisesta poistumasta tulee hyötykäyttöön noin 56 milj. m³ runkopuuta kuorineen. Metsään jää hakkuutähteenä ja luonnonpoistumana 29 milj. m³, josta valtaosa on latvusmassaa. Poistuman ja siten myös tähteen määrä tosin vaihtelee vuosittain metsäteollisuuden suhdanteista riippuen. Mitä enemmän puutavaraa hakataan, sitä enemmän jää tähdeksi.

Mikäli puuperäisten polttoaineitten käyttöä todella aiotaan laajentaa virallisen energiapolitiittisen tavoitteen mukaisesti ja ilman vero- ja tuotantotukea, on käytävä käsiksi nimenomaan hakkuutähteeseen. Koska hakkuutähteen energiareservi koostuu valtaosaltaan latvusmassasta, se poikkeaa muusta energiapuusta niin korjuutekniikan, säilyvyyden, polttoainekäyttötymisen kuin aiheuttamansa ravinnehävikinkin suhteen. Nämä poikkeavuudet on voitava hallita.

Metsiimme vuosittain jäävän hakkuutähteen ja luonnonpoistuman energiasisältö on 60 TWh. Määrä on niin mittava, että se vastaisi 15–20 % primaarienergian kokonaiskuluksestamme. Tämä luku on ymmärrettävä *hakkuutähteen korkeimmaksi teoreettiseksi energiapotentiaaliksi*. On kuitenkin joukko teknis-taloudellisia ja ekologisia rajoitteita, jotka on otettava huomioon hakkuutähteeseen kätkeytyvän energiareservin käyttömahdollisuuksia arvioitaessa:

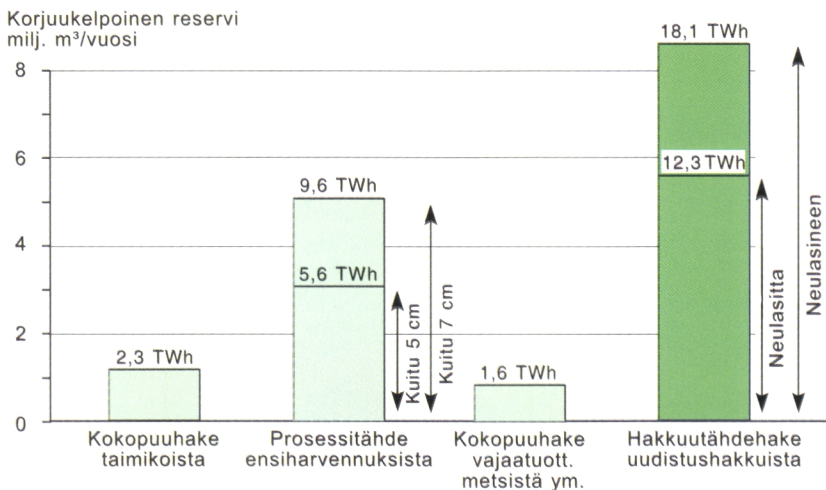
- *Uudistushakkuut/harvennushakkuut.* Tähteen talteenotto erillisenä tavaralajina tulee rajoittaa vain uudistusaloille, sillä harvennusleimikoissa tähteitä tarvitaan ajouria ja juuristoja suojaamaan sekä kasvatettavalle puustolle ravinteita vapauttamaan. Tähteitten keruu harvennusleimikoista olisi vaivalloista ja aiheuttaisi puustovaurioita. Kun harvennusleimikot eivät taloudellisesti tai ekologisesti sovellu tähteen keruukohteiksi, 25 % potentiaalista jää mahdollisuuksien ulkopuolelle. Tällä ei tarkoiteta, etteikö taimikoista ja nuorista harvennusleimikoista voitaisi korjata energiakäyttöön esimerkiksi kokopuuhaketta, mutta sanan varsinaisessa merkityksessä silloin ei ole kysymyksessä hakkuutähteen käyttöönotto.
- *Leimikon vähimmäiskoko.* Hakkuutähteen talteenoton kustannukset kohoavat, kun leimikkokohtainen kertymä supistuu. Siksi leimikolle on asetettava vähimmäiskoko, joka riippuu puulajista, metsä- ja kaukokuljetusetäisyyksistä, naapurileimikon läheisyydestä, työmaitten ketjutuksesta, kaluston tehokkuudesta ja siirreltävyydestä jne. Käytännössä vähimmäisrajaan vaikuttaa myös autokaluston kuormatilavuus. Käsillä olevassa arviossa rajataan pois sellaiset päätehakkuuksuuskokot, joissa runkopuun kertymä on alle 175 m³, sekä sellaiset päätehakkuumänniköt, joissa runkopuun kertymä on alle 350 m³. Vähimmäisvaatimukseksi on tällöin katsottu, että tähdettä on kerryttävä ainakin yhden perävaunullisen autokuorman edestä eli 100–120 i-m³. Valtakunnallisessa laskelmassa leimikon kokorajauksen arvioidaan supistavan kerättävissä olevan hakkuutähteen määrää 20 %. Metsäenergia MetEr Ky:n hakkuriautoon perustuvassa joustavassa hankintajärjestelmässä tästä vaatimuksesta on tingitty, niin että uudistusalan vähimmäiskooksi on rajattu puoli hehtaaria.
- *Talteenoton tarkkuus.* Hakkuutähdettä ei kannata eikä tule missään leimikkoloissa kerätä talteen täysimääräisesti, vaan osan annetaan jäädä paikalleen. Kun hakkuukoneen työskentelytekniikka mukautetaan tähteen hyötykäyttöön tähtäväksi, latvusmassa ja hukkarunkopuu saadaan kerääntymään talteenottoa helpottaville kasoille. Tämä nopeuttaa keruuta, vähentää epäpuhtauksia ja kasvatkaa kertymää. Valtakunnallisessa laskelmassa oletetaan, että tähteestä saadaan talteen 70 %, jos keruu tapahtuu ennen kuin kasat kuivuvat ja varistavat neulasensa. Hävikki siis supistaa talteensaatanavan tähteen määrää 30 %. Hukkarunkopuu kerätään talteen tarkemmin kuin oksat, sillä latvuksia käytetään apuna pakottamaan irrallisia oksia hakkurin kitaan.
- *Neulasten varistaminen hakettamista edeltävällä varastoinnilla.* Jos tähde saa kuivahtaa hakkuukoneen tai kuormatraktorin tekemillä kasoilla, se menettää neulasia ja ennen pitkää myös ohuita oksankärkiä. Kuivattamisen tavoitteita voivat olla maan ravinnehävikin torjuminen, neulasista tulipesässä aiheutuvien tuhka- ja korroosio-ongelmien lieventäminen ja polttoaineen kosteuden alentaminen. Varastoinnilla varaudutaan myös talvikauden käyttöhuippuihin, tai kysymyksessä voi olla pelkästään korjuun aikataulutuksesta ja leimikoitten ketjutuksesta aiheutuva viive. Jo kesäkauden kuluessa saattaa varista ja katkeilla pois kuusella jopa 20–30 % ja männylläkin 15–25 % biomassasta. Yleensä kuivuminen jää kuitenkin kasojen sisäosissa vaillinaiseksi eikä johda näin suuriin menetyksiin. Keruu joka tapauksessa vaikeutuu, kun tähteet painuvat kuivuessaan maata vasten ja peittyvät pintakasvillisuuteen. Siksi kertymälaskelmankin kannalta on merkitystä sillä, otetaanko hakkuutähde talteen *tuoreena eli vihreänä vai kuivahtaneena eli ruskeana.*
- *Ekologisesti herkäät kasvupaikat.* Kuivat kankaat, rämeet ja muut ravinneköyhät kasvupaikat sekä erittäin kiviset ja niukkahumuksiset maat tulee maan köyhtymisen välttämiseksi rauhoittaa tähteen keruulta. Heikosti kantavia hakkuualoja

ja niitten osia on ravinteisuudesta riippumatta jätettävä pois maaperän painumis- ja vauriovaaran vuoksi, sillä sellaisilla paikoilla tähdepeitto on jätettävä maata suojaamaan. Menettelyohjeita ei ole vielä olemassa, ja linjaukseen tulee aikanaan vaikuttamaan tuhkan palauttamisen ratkaiseminen. Valtakunnallisessa arvioissa oletetaan, että 20 % hakkuualoista rajataan ekologisista ja kantavuussyistä keruun ulkopuolelle. Koska kysymyksessä olevat hakkuualat eivät ole erityisen puisevia, kerättävissä olevan tähteen kokonaismäärä supistuu tätä kautta kuitenkin vain 15 %.

Edellä mainittujen laskentaperusteitten ja olettamusten pohjalta syntyy suuntaa-antava korjuukelpoisen hakkuutähdereservin valtakunnallinen arvio, jossa esimerkiksi kuljetusetäisyyksistä johtuvia taloudellisia rajoitteita ei ole otettu huomioon. Lopputulokseen vaikuttaa, korjataanko tähde vihreänä hakkeena neulasineen vai ruskeana hakkeena neulasitta:

| | Teknisesti korjuukelpoinen hakkuutähdereservi | | |
|-------------------|---|-----------------------------------|-----------------------------|
| | Biomassa milj. m ³ /vuosi | Energiasisältö milj. toe/vuosi | Energiasisältö TWh/vuosi |
| Vihreänä hakkeena | 8,6 | 1,6 | 18,1 |
| Ruskeana hakkeena | 5,6 | 1,1 | 12,3 |

Vastoin eräitä aikaisempia arvioita päätehakkuukuusikoitten lisäksi myös päätehakkuumänniköt on tässä laskelmassa katsottu pienemmästä kertymästä huolimatta kelvollisiksi keruukohteiksi. Lyhyen kuljetusetäisyyden takaa tuotettu männyn hakkuutähdehake saattaa itse asiassa olla edullisempaa kuin kauempaa kuljetettu kuusen hakkuutähdehake, vaikka hehtaariohtainen kertymä onkin pienempi. Uudistusalojen tähteestä tuotettu hake, männiköistäkin, on joka tapauksessa kustannuksiltaan halvempaa kuin esimerkiksi pienpuuleimikoitten hake.



Kuva 6. Korjuukelpoinen metsäenergiareeservi. Ensiharvennusleimikoitten energiapotentiaaliin vaikuttaa kuitupuun vähimmäisläpimittavaatimus, joka laskelmassa on vaihtoehtoisesti joko 5 cm tai 7 cm (Hakkila & Fredriksson 1996).

Neulasineen korjattuna uudistusalojen hakkuutähde edustaa näillä laskentaperusteilla kahta kolmannesta ja neulasettomanakin puolta koko korjuukelpoisesta metsäenergiareservistämme (kuva 6). Paljonko hakkuutähdettä todellisuudessa tulee olemaan saatavilla, riippuu lopulta hakkuumäärästä, teknisestä kehityksestä, ekologisista tekijöistä ja polttoaineitten hintasuhteista. Siksi ei ole yllättävää, että eri näkökulmista ja eri aikoina tehdyt arviot saattavat poiketa suurestikin toisistaan. VTT Energia on hie-man eri reunaehdoin päätenyt merkittävästi pienempään arvioon, 3,7 milj. m³/vuosi (Helynen & Nousiainen 1996). Ruotsin maatalousyliopiston soveltamat laskentaperusteet, joissa tosin edellytetään tuhkan täysimääräistä kierrätystä, ovat toisaalta paljon rohkeampia. Kun suurimmaksi kestäväksi hakkuumääräksi on Ruotsissa oletettu 87 milj. m³ vuodessa, sitä vastaavaksi korjuukelpoiseksi hakkuutähteeksi on arvioitu pe-räti 41 milj. m³ (Hektor ym. 1995).

Valtakunnallinen hakkuutähdearvio on tarpeen lähinnä pitkän tähtäyksen suunnittelussa ja energiapoliittisessa päätöksenteossa. *Kunta- ja laitospolttamista suunnittelua varten* tarvitaan yksityiskohtaisempia alueellisia arvioita, jotka perustuvat joko valtakunnan metsien inventointitietoihin tai metsätaloussuunnitelmien kuvioittaisiin tietoihin (Mielikäinen ym. 1995, Pasanen ym. 1997). Oleellista tuolloin on, että tunnetaan uudistusalojen hakkuumahdollisuudet ja toisaalta nuorten metsien hoitotarve ainakin kymmeneksi vuodeksi eteenpäin. Tällaisiin laskelmiin voidaan yhdistää myös kustannusrajoitteita esimerkiksi kuljetusmatkan suhteen, mutta työvaikeustekijöitten ja korjuulogistiikan vaikutuksia ja keskinäisiä riippuvuussuhteita joudutaan tuolloin aina yksinkertaistamaan.

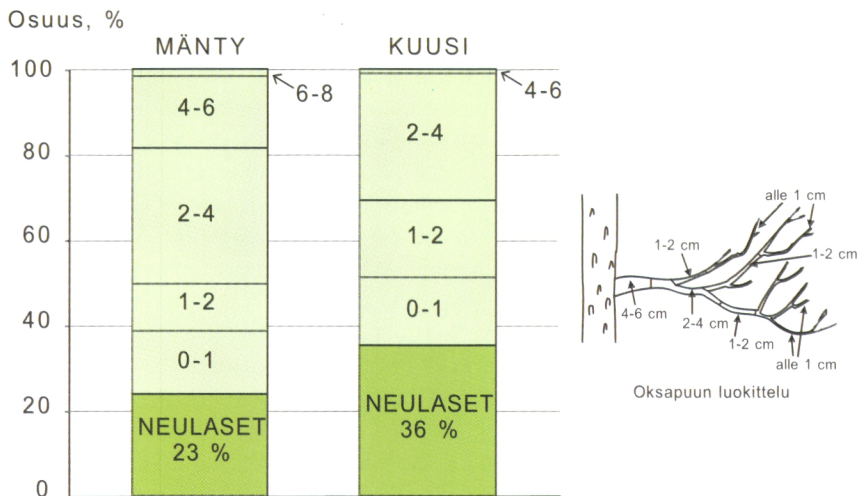
3 Hakkuutähde polttoaineena

3.1 Hakkuutähteen polttoaineominaisuudet

Elävien oksien kuivamassan jakauma puuaineen, kuoren ja neulasten kesken on järeissä mänty- ja kuusipuissa seuraava. Hakkuutähteessä on lisäksi myös kuivia oksia ja vaihteleva osuus hukkarunkopuuta, joten hakkuutähteestä tehdyssä hakkeessa puuaineen osuus on suurempi ja neulasten pienempi kuin pelkästään elävissä oksissa (Hakkila 1969):

| | Männyn uudistushakkuut | Kuusen uudistushakkuut |
|----------|---------------------------------------|---------------------------|
| | Elävien oksien kuivamassan jakauma, % | |
| Puuaines | 46 | 36 |
| Kuori | 31 | 28 |
| Neulaset | 23 | 36 |
| Yhteensä | 100 | 100 |

Ositteet poikkeavat toisistaan teknisten ominaisuuksiensa suhteen. Energiakäytön kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat kemiallinen koostumus, puuaineen tiheys, kosteus, tuhkapitoisuus sekä kaikkien edellisten tuloksena määräytyvä lämpöarvo.



Kuva 7. Elävien oksien kuivamassan jakautuminen neulasiin ja kuorellisen oksapuun paksuusluokkiin (cm) Etelä-Suomen uudistusaloilla. Puuston rinnankorkeusläpimitta 25–35 cm.

Ominaisuudet muuttuvat oksan tyveltä oksan latvaa kohti, ja siitä syystä oksan paksujen ja ohuitten osien polttoaineominaisuudet ovat jossain määrin erilaiset. Kuva 7 osoittaa, miten elävien oksien kuivamassa jakaantuu paksuusluokkiin.

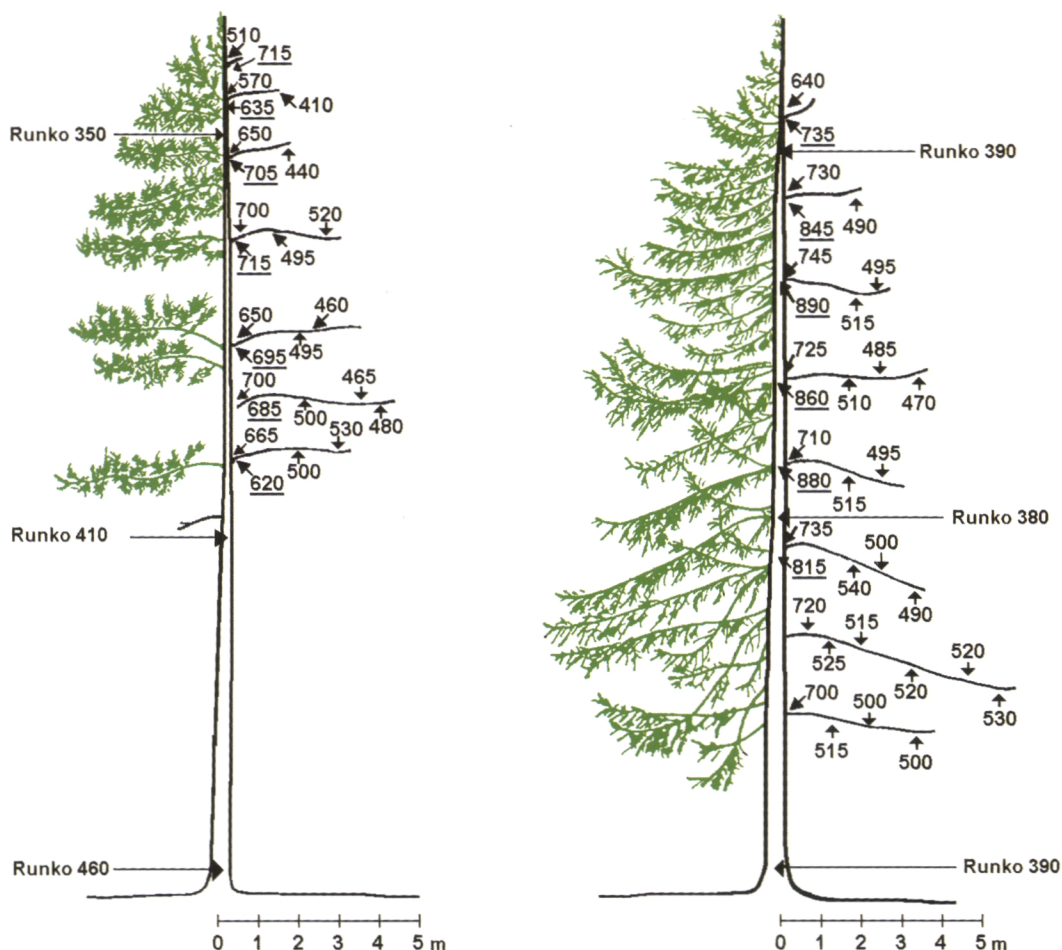
Oksien kuoripitoisuus on pienestä läpimitasta johtuen suuri. Kuoressa on puuaineeseen verrattuna moninkertainen tuhkapitoisuus, mutta siitä huolimatta kuoren lämpöarvo on kuivamassayksikköä kohti laskettuna yleensä hiukkasen suurempi kuin puuaineen. Etenkin männyllä kuori on oksapuuhun verrattuna kuitenkin kevyttä, jolloin sen lämpöarvo tilavuusyksikköä kohti on puuainetta alhaisempi.

Oksien puuaineen poikkeukselliset ominaisuudet juontavat juurensa *reaktiopuun runsaudesta*. Männyksen ja kuusen oksan alapuolisko muodostuu lylpyusta ja koivun oksan yläpuolisko taas vetopuusta, jotka antavat oksalle sen lujituksen lumen ja tuulen vääntöä vastaan. Kuusen ja männyksen oksapuun tyypillisiä ominaisuuksia runkopuuhun verrattuina ovat:

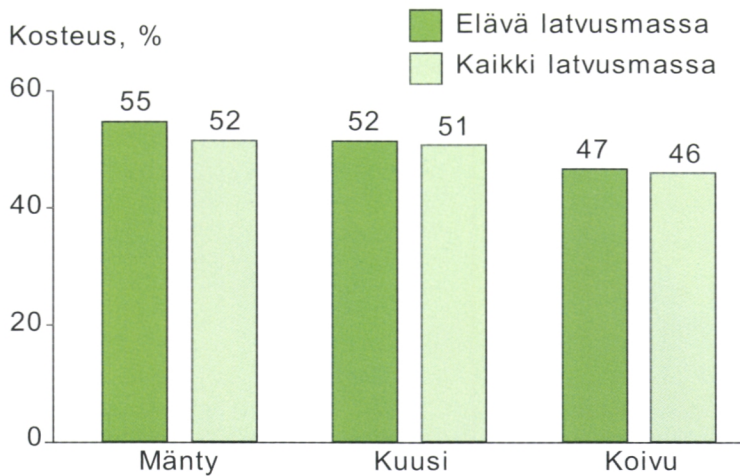
- *Kuidut ovat lyhyitä*, poikkileikkaukseltaan pyöreitä ja paksuseinäisiä soveltuen kehnosti paperin valmistukseen.
- *Ligniinin osuus on suuri* ja selluloosan pieni. Koska ligniinin lämpöarvo on korkeampi kuin selluloosan, oksapuun lämpöarvo on massayksikköä kohti hieman korkeampi kuin runkopuun.
- Oksapuu sisältää *enemmän uuteaineita* kuten terpeenejä, tanniineja, pihkaa, vahoja, rasvoja jne. Vielä runsaammin uuteaineita on neulasissa. Uuteaineilla on yleensä korkeampi lämpöarvo kuin selluloosalla.
- Oksapuu sisältää *enemmän mineraaliaineita eli tuhkaa*. Erityisen runsaasti tuhkaa on kuusen neulasissa (Taulukko 4). Tuhka on palamatonta ja alentaa biomassan lämpöarvoa. Siitä aiheutuu myös huolto-, kaatopaikka- ja kierrätyskustannuksia. Puun tuhkan korkeaa alkalipitoisuutta voidaan toisaalta hyödyntää puun ja turpeen sekapoltoissa, sillä alkalit sitovat rikkiä ja edesauttavat usein verraten pienenäkin seossuhteena laitosta pysyttelemään säädetyn rikinpäästörajan alapuolella.

Taulukko 4. Männyn ja kuusen hakkuutähteen tuhkapitoisuus. Ei sisällä palamatonta hiiltä eikä korjuussa tähteeseen joutuvaa hiekkaa (Hakkila & Kalaja 1983).

| Tähteen biomassaosite | Männyn hakkuutähde Tuhkan osuus kuivamassasta, % | Kuusen hakkuutähde |
|------------------------|--|-----------------------|
| Kuorellinen runkopuu | 0,8 | 1,1 |
| Kuorellinen oksapuu | 1,0 | 1,9 |
| Neulaset | 2,3 | 5,1 |
| Vihreä hakkuutähdehake | 1,1 | 2,7 |
| Ruskea hakkuutähdehake | 1,0 | 1,8 |



Kuva 8. Esimerkki kuorettoman oksapuun kuiva-tuoretiheyden (kg/m^3) vaihtelusta oksan tyvestä oksan kärkeen järeässä männynssä ja kuusessa. Alleviivatut luvut edustavat rungon sisään kasvanutta oksapuuta (Hakkila 1971).



Kuva 9. Elävän latvusmassan ja kaiken latvusmassan keskimääräinen kosteus kaatotuoreena Etelä-Suomessa (Hakkila 1991).

- Paksuseinäisten reaktiopusolujensa ansiosta *oksapuu on varsin tiheätä*. Kuusen oksien paksuimmissa osissa puuaineen kuiva-tuoretiheys on suurempi kuin millään muulla puuraaka-aineella Suomessa. Oksan tyvellä se on jopa yli 700 kg/m³ eli miltei kaksinkertainen runkopuuhun verrattuna, mikä puolestaan merkitsee korkeata lämpöarvoa biomassan kuutiometriä kohti laskettuna. Tiheys kuitenkin laskee oksan kärkeä kohti (kuva 8). Neulasten kuiva-tuoretiheys on selvästi runkopuuta pienempi.
- Etenkin kuusella tuoreen latvusmassan *kosteus on runkopuuta alhaisempi*, mikä osaksi on seurausta korkeasta puuaineen tiheydestä. Koivun oksissa, kuten koivun runkopuussakin, kosteus on aina alhaisempi kuin havupuulla vastaavasti. Kuolleet oksat alentavat latvusmassan keskimääräistä kosteutta (kuva 9).

Neulasissa on runsaasti mineraaliaineita, joista eräitten pelätään olevan haitaksi poltossa. Esimerkiksi *natriumin ja erityisesti kloorin* katsotaan kiihdyttävän käsittely- ja polttolaitteitten korroosiota. Tyhjentävää tutkimustietoa asiasta ei kuitenkaan ole. Metsäntutkimuslaitoksen mittauksissa neulasten natriumpitoisuus on ollut 17–35 mg/kg ja kloorin 300–400 mg/kg. Edellinen ei näytä juurikaan muuttuvan varastoinnin aikana, mutta jälkimmäinen pienenee verraten nopeasti. *Raskasmetallien* pitoisuudet ovat niin pieniä, etteivät ne ole havaittavissa laboratoriomittauksissa.

Polttoaineen lämpöarvo määräytyy sen *hiili- ja vetypitoisuuden* mukaan, sillä muut aineosat ovat palamattomia. Hiilen ja vedyn runsaus merkitsee siis korkeata lämpöarvoa. Sekä rungon että latvusmassan eri ositteissa hiilen osuus on runsaat 50 % ja vedyn runsaat 6 % kuivamassasta. Poikkeuksena on koivun ulkokuori eli tuohi, jonka suberiini ja valkoisen värin antava betuliini sisältävät sekä hiiltä että vetyä huomattavan paljon (kuva 10).

Vedyn palaessa ilmakehään vapautuu vesihöyryä, hiilen palaessa hiilidioksidia. Mitä suurempi osa polttoaineen energiasisällöstä on peräisin hiilestä sitä suuremmat ovat poltossa syntyvät hiilidioksidipäästöt. Biomassassa *vety/hiilisuhde* on fossiilipoltto-

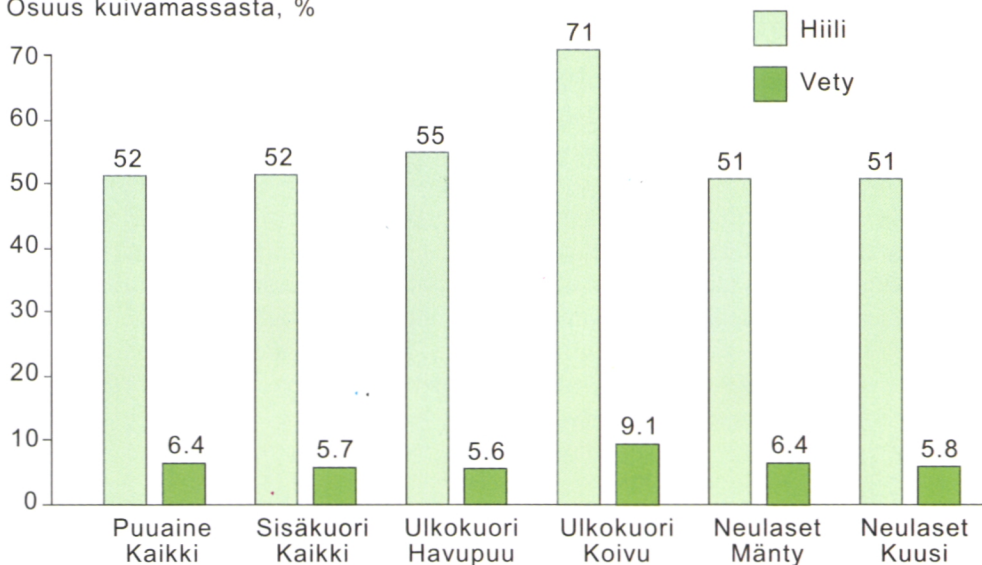
aineisiin, erityisesti maakaasuun verrattuna alhainen. Tästä syystä puuperäisten polttoaineitten *hiilidioksidin ominaispäästö* on korkea, 400 g CO₂/kWh. Maakaasulla se on vastaavasti 200, öljyllä 270, hiilellä 340 ja turpeella 400 g CO₂/kWh. Toisin sanoen, hiilidioksidia vapautuu tuotettuun lämpöenergiaan verrattuna runsaimmin, kun polttoaineena on puu tai turve.

Puun poltossa kysymyksessä on kuitenkin *hiilidioksidin luonnollinen kierto* yhteyttävän kasvin ja ilmakehän välillä eikä peruuttamaton muutos ilmakehän hiilidioksiditasapainossa kuten fossiilipolttoaineita käytettäessä. Kun harjoitetaan kestäväää metsätaloutta, uusi puusukupolvi sieppaa ilmakehästä hiiltä takaisin yhtä paljon kuin edellisen sukupolven biomassasta on palamisen tai lahoamisen kautta vapautunut. Siksi hakkuutähteen energiakäyttö ei juurikaan kasvata hiilidioksidin tai muitten kasvihuonekaasujen pitoisuuksia ilmakehässä, ja kun hakkuutähtellä korvataan muita polttoaineita, päästöt supistuvat vastaavasti. Poikkeuksena on vain korjuu- ja kuljetuskaluston polttoaine, joka uudistusalojen tähdettä hyödynnettäessä vastaa 2–3 % tuotetun energian kokonaismäärästä. Tästä syystä on sovittu kansainvälisesti, että puuperäisten polttoaineitten hiilidioksidipäästöjä ei lasketa valtioitten päästötaakaan.

3.2 Hakkuutähteen lämpöarvo

Tehollinen lämpöarvo osoittaa biomassaa poltettaessa vapautuvan lämpöenergian vähennettynä veden höyryntymiseen kuluvalle energialla. Höyryntyvä vesi on lähtöisin osin biomassan alunperin sisältämästä vedestä ja osin poltossa syntyvästä vedestä, kun vety yhtyy happeen. Kysymys on huomattavista vesimääristä, sillä esimerkiksi tuoreessa hakkuutähteesä vettä on jopa 500 kg/m³, ja poltossa syntyy vettä lisää yli 150 kg/m³.

Osuus kuivamassasta, %



Kuva 10. Hiilen ja vedyn osuus uudistushakkuualan oksien biomassaositteissa (Nurmi 1997a).

Taulukko 5. Männyn ja kuusen vihreän hakkuutähteen tehollinen lämpöarvo kosteudesta riippuen kuivamassaa, kosteaa massaa (Nurmi 1997a) ja hakkeen irtokuutiometriä kohti laskettuna. Irtokuutiometrin kuivamassasisällöksi oletettu 165 kg.

| Puulaji | Kosteus, % | | | | |
|--|------------|------|------|------|------|
| | 0 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| Tehollinen lämpöarvo, MWh/tonni kuivamassaa | | | | | |
| Mänty | 5,6 | 5,3 | 5,1 | 4,9 | 4,6 |
| Kuusi | 5,4 | 5,1 | 4,9 | 4,7 | 4,4 |
| Tehollinen lämpöarvo, MWh/tonni kosteaa massaa | | | | | |
| Mänty | 5,6 | 3,7 | 3,1 | 2,5 | 1,8 |
| Kuusi | 5,4 | 3,6 | 3,0 | 2,4 | 1,7 |
| Tehollinen lämpöarvo, MWh/i-m ³ haketta | | | | | |
| Mänty | 0,92 | 0,87 | 0,84 | 0,81 | 0,76 |
| Kuusi | 0,89 | 0,84 | 0,81 | 0,78 | 0,73 |

Tehollinen lämpöarvo ja *polton hyötysuhde* nousevat, kun biomassan kosteutta alennetaan. Käyttäjien asettamat kosteusrajat riippuvat laitoksen tekniikasta, sekapoltoissa myös rinnakkaispolttoaineitten kosteudesta. Suurten laitosten hyväksymä kosteuden enimmäisraja on yleensä 50–55 %. Pienemmät hakelaitokset tavoittelevat usein 35–45 %:n kosteutta. Uusinta tekniikkaa soveltavilla lämpölaitoksilla kuitenkin myös vesihöyryyn siirtynyt energia voidaan ottaa talteen savukaasut lauhduttamalla, jolloin hyötysuhde paranee ja kosteuden merkitys vähenee. Jos laskennan lähtökohtana on biomassan tehollinen lämpöarvo, uudenaikaisen kattilan laskennallinen hyötysuhde saattaa näillä keinoin nousta jopa yli 100 %:n. Savukaasujen lämpöenergiaa voidaan hyödyntää vaihtoehtoisesti myös kostean polttoaineen kuivatukseen.

Paitsi kosteudesta hakkuutähteen lämpöarvo riippuu myös puuaineen, kuoren ja viheraineen paljousuhteista. *Kuivamassaa kohti laskettuna* pääpuulajiemme biomassaositteitten väliset lämpöarvoerot tosin ovat vähäisiä, mutta *kiintokuutiometriä ja irtokuutiometriä kohti laskettuina* ne ovat merkittäviä (Taulukko 5). Sekä puulajien että biomassaositteitten välillä on suuria eroja kuiva-tuoretiheydessä, joka vaihtelee esimerkiksi neulaspitoisuudesta, oksien paksuudesta ja tähteen runkopuuosuudesta riippuen. Hakkeen irtotiheydet taas vaihtelevat esimerkiksi tikkuisuudesta, kuormaustavasta ja kuljetuksen aikana tapahtuvasta painumasta riippuen. Hakkuutähdehakkeen irtokuutiometrin lämpöarvo vaihtelee välillä 0,7–0,9 MWh/i-m³, kun jyrshinturpeen lämpöarvo on vastaavasti 0,9 MWh/i-m³. Hakkuutähdehakkeen *lämpöarvo määräytyy luottavimmin kuivamassan perusteella*.

3.3 Varastointi ja kuivuminen

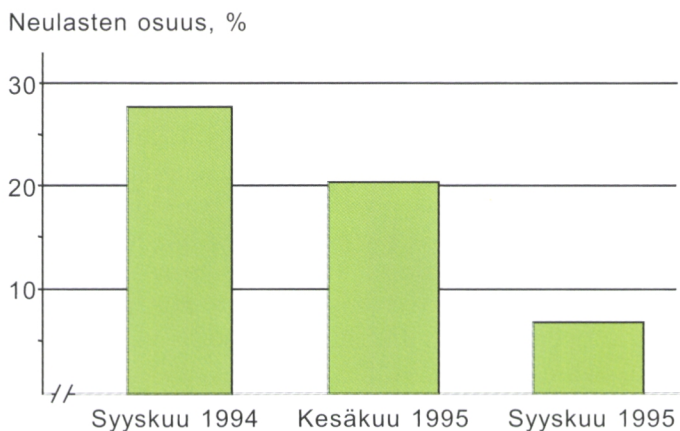
Varastointi on oleellinen osa metsähakkeen hankintaketjua ja -logistiikkaa. Varastointivaiheen suunnittelun lähtökohtana on toisaalta varaston sijaintipaikka ja toisaalta varastoinnin ajoitus hankintaketjun muitten toimintojen suhteen.

Tähdettä varastoidaan hakkuukoneen tekemillä *pienillä kasoilla palstalla*, kuorma-
traktorin tekemillä *suurilla kasoilla tienvarsivarastossa* tai keskitettyä haketusta so-
vellettaessa *suurilla kasoilla tai aumoilla terminaalissa tai käyttöpaikalla*. Termi-
naali- ja käyttöpaikkavarastoinnin kohteena on usein valmis hake tai murske. Uute-
na vaihtoehtona kehitellään hakettamattoman tähteen varastointia paalattuna tai ni-
putettuna. Kun toimitussopimukset laajenevat ja toiminta vakiintuu, tulee ajankoh-
taiseksi ottaa suunnittelussa käyttöön myös *hakkuutähteen pystyvaraston* käsite.

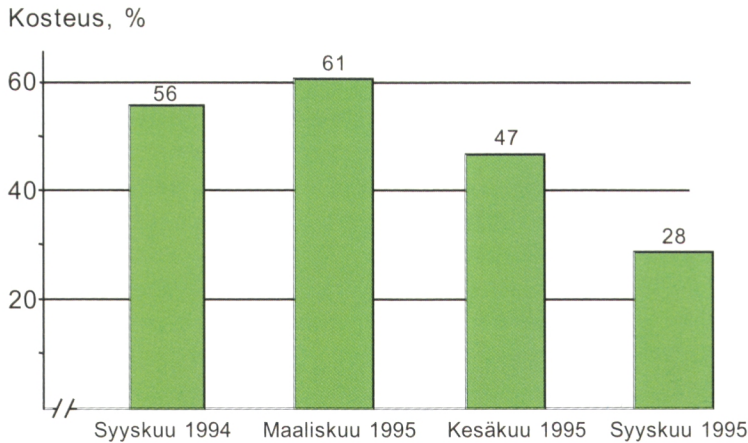
Varastoinnista aiheutuu aina välittömiä lisäkustannuksia. Niitä koituu työpalkkojen
koroista, varastopaikkojen ylläpidosta, ylimääräisistä purku- ja kuormauskerroista
sekä raaka-aineen hävikistä. Varastointi on kuitenkin välttämätöntä, ja saman han-
kintaketjun puitteissa sitä voi tapahtua useissakin eri vaiheissa. Tavoitteita ovat:

- *Varmistetaan hankintajärjestelmän toimivuus* talven käyttöhuippujen, epä-
edullisten korjuusäitien, konerikkojen ja työrauhahäiriöitten varalta.
- *Puskuroidaan peräkkäisten toimintojen välistä sidonnaisuutta* hankintaket-
jussa, toisin sanoen katkaistaan häiriöaltis kuuma ketju toisistaan riippumat-
tomiksi osiksi.
- *Parannetaan polttoaineen laatua* esimerkiksi kuivattamisen, neulasten varis-
tamisen tai keskuskäsittelyasemien tehokkaamman laadunvalvonnan keinoin.
- *Supistetaan tähteen talteenoton aiheuttamaa ravinnehävikkiä* varistamalla
neulasia hakkuualalle.
- *Vähennetään käsittelylaitteitten ja kattiloitten korroosiota* varisuttamalla neulasia.

Kuivumiseen liittyy neulasten variseminen, joka käynnistyy kuusella herkemmin kuin
männyllä. Koska neulasten osuus on männyllä noin 20 % ja kuusella 30 % hakkuu-
tähteen kuivamassasta, *variseminen johtaa korjuukertymän hupenemiseen ja yksik-
kökustannusten kasvuun* ainakin keruuvaiheen osalta (kuva 11). Varisemisen lisäk-
si neulasmassaa kuluttavat myös biokemialliset reaktiot. Metsäntutkimuslaitoksen
koesarjassa kuusen hakkuutähteen kuivamassa hupeni hakkuukoneen jättämällä ka-
soilla vuoden kuluessa 20 %. Viidennes hävikistä oli seurausta biokemiallisista ha-
jotusreaktioista, neljä viidennestä varisemisesta.



Kuva 11. Neulasten osuus hakkuukoneen tekemiltä kasoilta valmistetun kuusen
hakkuutähdehakkeen kuivamassassa. Kasat tehty syyskuussa 1994,
haketuskoheet kesäkuussa ja syyskuussa 1995 (Nurmi 1994).



Kuva 12. Esimerkki kuusen hakkuutähteen kosteuden muuttumisesta hakkuukoneen tekemillä kasoilla (Nurmi 1994).

Lyhimmillään esivarastointi palstalla on silloin, kun tähde kuljetetaan kannolta tienvarteen ainespuun korjuun yhteydessä samalla kuormatraktorilla vaikkakin eri ajokerroilla. Tähteessä ei tuolloin ennätä tapahtua hakkeen laadussa heijastuvia muutoksia. Myöhäissyksyllä ja talvella muutokset saattavat jäädä merkityksettömiksi, vaikka tähde lojuisi hakkuukoneen tekemillä kasoilla kuukausiakin.

Havupuisen hakkuutähteen kosteus on tuoreena 50–55 % (kuva 9). Syys- ja talvivarastoinnin aikana kosteus lisääntyy, mutta keväällä käynnistyy kuivuminen. Edullisissa oloissa kosteus voi pudota hakkuukoneen jättämällä kasoilla kesän mittaan alle 30 %:n (kuva 12). Tähde ei kuitenkaan säily näin kuivana pitkään vaan alkaa syksyn tullen vettyä. Siksi se tulisi kerätä hyvin tuulettuville varastokasoille tien varteen viimeistään syksyn kynnyksellä. Mitä korkeammille kasoille kuivahtanut tähde jätetään, sitä paremmin se säilyttää kosteutensa talvella.

Kuivuminen on nopeinta ja perusteellisinta kasan pinnalla. Siksi kosteus muuttuu suurilla varastokasoilla huomattavasti hitaammin kuin hakkuukoneen tekemillä pienillä kasoilla, oli kysymyksessä sitten kuivuminen tai vettyminen. Kuvan 12 esimerkkitapauksessa, jossa tähteen kosteus aleni vuoden varastointiaikana pienillä kasoilla 28 %:iin, päästiin suurilla tienvarsikasoilla rinnakkaiskokeessa samana aikana vain 42 %:n kosteuteen. Neulasmassan hävikki supisti hakekertymää hakkuukoneen kasoilta 21 % mutta tienvarsikasoilta vain 9 %. Neulasten variseminen ei ollut suurilla kasoilla yhtä perusteellista, ja irronneesta neulasmassasta jäi varastohaketuksessa paljon suurempi osa hakkeen mukaan.

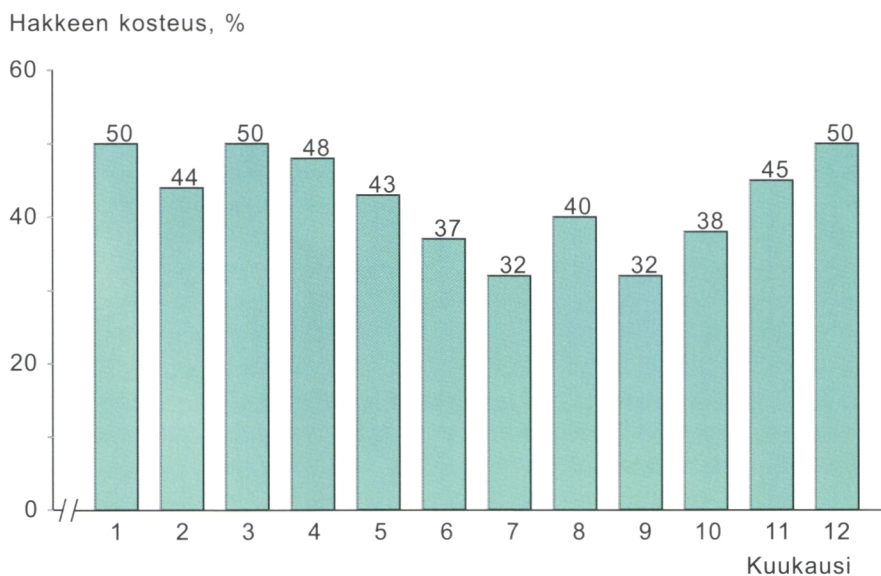
Kuivuminen kohottaa hakkeen lämpöarvoa ja estää holvaantumista ja jäätymisestä aiheutuvia ongelmia. Jos tavoitellaan mahdollisimman kuivaa hakkuutähdehaketta, tehokas vaihtoehto on siis kesäaikainen kuivatus palstakasoilla ja

keruu suurille kasoille varhain syyskesällä. Ruotsissa tienvarsikasat *suojataan usein sadetta vastaan kaksinkertaisella voimapaperilla*, jonka lujuutta on vahvistettu piellä ja lasikuitukudoksella (kuva 22). Suojapaperia valmistaa Walki Wisä Suomessa.

Koska suojapaperin levitys käsin on vaivalloista ja vaarallista, levitys tapahtuu kuormatraktorilla sen kuormaimen kouraan kiinnitetyn tukikehikon avulla. Kun kasa puretaan, myös suojapeite haketetaan tähteen muassa. Ruotsissa kokemukset ovat myönteisiä (Jirjis 1996) ja suojapeitteen käyttö yleistä. Suomessa tehdyssä koesarjassa peitteen vaikutus ei ollut yhtä selvä, mikä saattoi ainakin osin johtua varastokasojen suuresta korkeudesta (Nurmi 1997b).

Peittämisen kustannukset ovat Ruotsissa noin 3–4 mk/MWh. Toimenpiteen kannattavuus riippuu sekä hakkeen hintatasosta että kosteuden laitoskohtaisesta merkityksestä. Ruotsissa katsotaan kannattavaksi peittää ainakin osa lämpölaitosten talvikäyttöön varastoidusta hakkuutähteestä, mutta Suomen hintatasolla kannattavuus on heikompi.

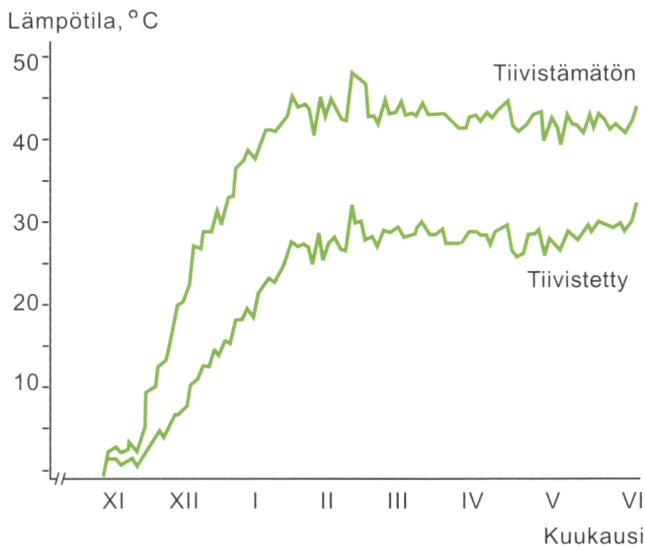
Lämpö- ja voimalaitoksille tulevan hakkuutähdehakkeen kosteus vaihtelee vuodenajoittain. Kesällä kosteus on alhaisimmillaan, mutta myös talvella on mahdollista saada kuivahkoa haketta, jos käytettävissä on hyvin suunniteltuja tähdevarastoja. Usein tällaisia kuivahtaneen tähteen varastoja pyritään purkamaan keskitalvella, jolloin lämmöntarve on suurin. Kuva 13 osoittaa hakkuutähdehakkeen kuukausittaisen vaihtelun neljän suuren toimittajan keskiarvona vuonna 1997. Keskitaso oli kesä-lokakuussa 30–40 % ja muulloin 45–50 %. Kuormittainen vaihtelu on kuitenkin suuri.



Kuva 13. Hakkuutähdehakkeen kosteus käyttöpaikalla neljän suuren toimittajan keskiarvona vuonna 1997.

Jotta polttoainetta olisi kaikissa tilanteissa saatavilla, käyttöpaikalla ylläpidetään valmiin hakkeen varastoa, jonka tulisi vastata ainakin muutaman vuorokauden tarvetta. Koska neulasissa ja nilakuoressa on runsaasti ravintoaineita, *hakkuutähdehake tarjoaa edullisen ympäristön mikrobitoiminnalle*. Sen seurauksena hakkeen lämpötila kohoaa kymmeniä asteita, mikä saattaa suuressa kasassa johtaa ääritapauksessa *itsesytytykseen*. Lämpeneminen on seurausta biokemiallisista hajotusreaktioista ja aiheuttaa siten aina myös kuiva-ainetappioita. Hajotustoiminnasta syntyy myös vettä, niin että varastoinnin aikana hakkeen kosteus saattaa jopa kohota erityisesti kasan pintakerroksissa, joihin sisäosan lämpimissä vyöhykkeissä muodostunut vesihöyry nousee ja tiivistyy.

Hakkeeseen kehittyvien sienirihmastojen kasvattamat itiöt ovat hengityselimiin joutessaan terveydelle haitallisia. Siksi hakkuutähdehaketta ei tule varastoida pidempään kuin polttoainehuollon häiriöttömyys välttämättä edellyttää, ja varastossa olevan *hakkeen vaihtuvuudesta tulee huolehtia*. Säilyvyys paranee, jos tähteen annetaan kuivua ja varistaa neulasensa ennen hakettamista. Pienissä käyttökohteissa hakkeen kosteus voidaan pudottaa kylmä- tai kuumailmakuivatuksella niin alhaiseksi, että mikrobitoiminta tyrehtyy, mutta hakkuutähdehakkeelle tyypillisessä suurkäytössä kuivatus ei ole taloudellista. Mikrobitoimintaa voidaan hidastaa myös kasan tiivistämisellä, jolloin mikrobien hapensaanti vaikeutuu (kuva 14). Tiivistäminen voidaan tehdä esimerkiksi telaketjutraktorilla.



Kuva 14. Tiivistämisen vaikutus tuoreesta hakkuutähdeestä tehdyn murskeen lämpenemiseen (mikrobitoimintaan) varastokasalla. Tiivistäminen telaketjutraktorilla survomalla (Nurmi 1996).

4 Hakkuutähteen talteenotto

4.1 Hankinnan suunnittelu

Polttohakkeen tuotanto hakkuutähteestä ei ole ainespuun hankinnasta erillinen korjuutapahtuma. *Hakkuutähdehakkeen hankinnan suunnittelu ja toteutus tulee integroida koko leimikon korjuuseen ja sitä seuraavaan uuden puusukupolven perustamiseen.* Ainespuun hankintaorganisaatio ja metsäkone- ja kuljetusyrittäjät tulee valmistaa myös hakkuutähdettä korjaamaan.

Käyttöpaikalle toimitettuna hakkuutähdehakkeen arvo on enintään 10 % leimikon runkopuutavaran arvosta. Kantorahaa hakkuutähteestä ei makseta nykyoloissa lainkaan. Siksi on itsestään selvää, että *integroitu korjuu tapahtuu arvokkaamman ainespuun ehdoilla.* Ainespuun korjuuta voidaan kuitenkin kehittää siten, että luodaan edellytykset tähteen taloudelliselle talteenotolle uudistushakkuun yhteydessä. Kysymyksessä ei olekaan enää tähde, vaan *metsähakkeesta tulee ainespuun korjuussa saatava sivutuote.*

Integroitu korjuu alkaa leimikon ostolla ja suunnittelulla. Vaikka ratkaisuvälillä tähteenkin suhteen on metsän omistajalla, ainespuun ostaja on etulyöntiasemassa varaamaan option tähteen talteenottoon. Niinpä Ruotsissa, missä metsähakkeen tuotanto on paljon mittavampaa kuin Suomessa, 63 % polttohaketta toimittavista yrityksistä on kytköksissä metsäteollisuuteen (Hillring 1996).

Ennenkuin päätös talteenotosta tehdään, punnitaan ekologiset kriteerit ja rajoitteet. Pehmeillä mailla on otettava huomioon, ettei tähteitä voida käyttää totuttuun tapaan maanpinnan suojana. Hakkuutähteen laajamittainen käyttö mahdollistaa haketustyömaitten keskittämisen, jolloin koneitten siirtomatkat lyhenevät ja toiminnallinen käyttöaste nousee.

Päätös hakkuutähteen talteenotosta tulee ehdottomasti tehdä ennen ainespuun korjuun aloittamista, mieluummin jo kaupanteon yhteydessä, ja ratkaisu tulee saattaa hakkuukoneen kuljettajan tietoon. *Hakkuukoneen työskentelytekniikka mukautetaan* tähteen talteenottoon. Jos tähdettä ei hyödynnetä, kuljettaja pyrkii levittämään sen ajouran suojaksi. Jos tähde hyödynnetään, kuljettaja pyrkii jättämään sen kasoille ja päinvastoin välttää ajamasta kasojen päällä.

Metsäteollisuuden hankintaorganisaatioitten ohella tarvitaan *metsänhoitoyhdistysten myötävaikutusta* leimikkotietojen välittäjänä, tähteen ja pienpuun keräämisessä tien varteen sekä energiapuun toimituksissa paikallisille lämpölaitoksille. Uusi metsänhoitoyhdistyslaki sallii metsänhoitoyhdistysten osallistumisen polttopuun kauppaan ilman valtakirjamenettelyäkin, vaikka laki ehkä muutoin rajoittaa metsänhoitoyhdistysten toimintaa puukaupassa. Metsänhoitoyhdistysten olisi hyvä olla mukana hakkuutähteen hyödyntämisessä myös siksi, että tähteen talteenotto vaikuttaa metsän uudistamistyön ajoittumiseen, menetelmän valintaan ja kustannuksiin. Uudistaminenhan jää usein metsänhoitoyhdistysten toteutettavaksi.

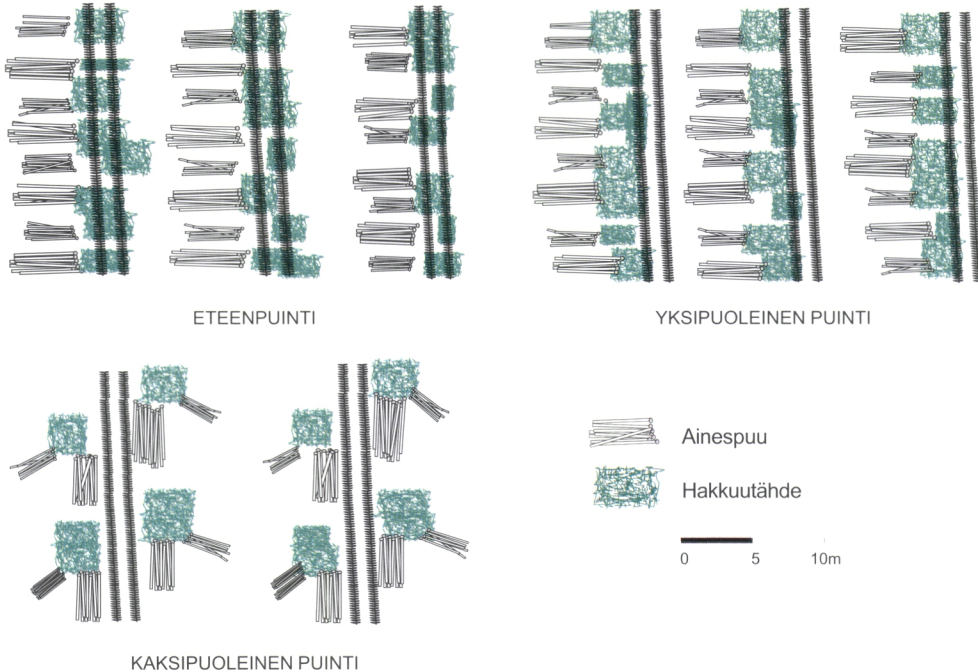
Suunnittelu alkaa kertymääriviosta, joka laaditaan runkopuupoistuman pohjalta esimerkiksi luvussa 2.4 esitettyä menettelyä noudattaen. Kertymäärä voitaisiin kytkeä myös hakkuukonemittaukseen, mutta siihen ei ole vielä valmiutta.

Tähteen *kuivattamistavoite* vaikuttaa hankintatyöhön ja metsän uudistamisen aikatauluun. Jos tähte jätetään kesän yli palstalle, menetetään mahdollisuus kuljettaa sekä ainespuu että tähte tienvarteen samalla kuormatraktorilla saman työmaasiirron puitteisissa. Silloin ei myöskään päästä perustamaan uutta metsikköä välittömästi hakkuun jälkeen. Neulasten varistessa ja oksankärkien katkeillessa biomassakertymäkin jää 15–30 % pienemmäksi kuin korjattaessa tähte tuoreena. Mutta vastapainoksi saadaan kuivempaa, lämpöarvoltaan ja säilyvyydeltään parempaa, ja polttokattilassa vähemmän korroosiota aiheuttavaa haketta, samalla kun metsämaan ravinnetappiot supistuvat.

4.2 Tähteen kasaus hakkuukoneella

Hakkuutähteen kustannusetuna pienikokoiseen taimikko- ja ensiharvennuspuuhun verrattuna on, että sitä päästään *käsittelmään alusta lähtien massa-artikkelina*. Talteenotto kuitenkin edellyttää, että hakkuukone jättää tähteen jatkokäsittelyä helpottaville kasoille eikä levälleen. Kasat nopeuttavat tähteen keruuta kuormatraktoriin, kasvattavat kertymää ja estävät epäpuhtauksia joutumasta tähteen sekaan.

Kun hakkuutähteen talteenottotekniikkaa ryhdyttiin kehittämään 1970-luvun alussa, uudistushakkuutkin tehtiin vielä moottorisahalla metsurityönä. Tähte jäi hajalleen, joten talteenotto edellytti kasausta. Sitä varten kehitettiin erikoislaitteita, esimerkiksi pienikokoiseen pyöräkuormaajaan asennettu haarukkapiikkinen etukuormain ja kuormatraktorin puutavarakouran tilalle vaihdettu hakkuutähdeharava. Kasaus onnistui näillä välineillä, mutta siitä koitui ylimääräisiä kustannuksia.



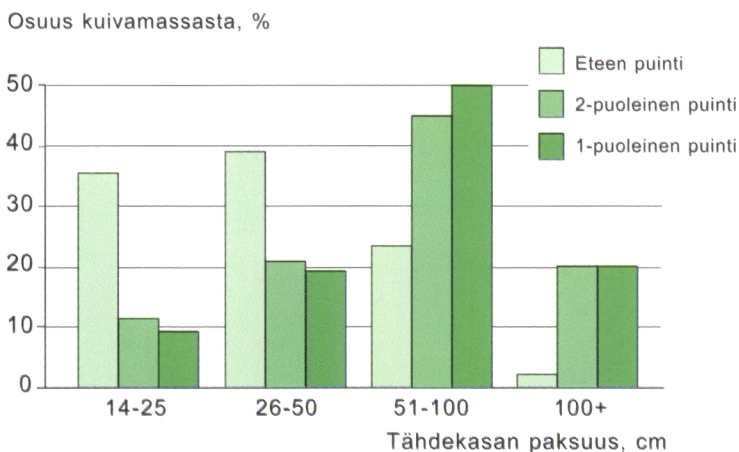
Kuva 15. Tähteen sijainti ajourien suhteen sovellettaessa tavanomaista (eteenpuinti) tai tähteen talteenottoon mukautettua yksi- tai kaksipuoleista (sivullepuinti) hakkuutekniikkaa uudistusalan puunkorjuussa (vrt. Nurmi 1994).

Kun hakkuu koneellistui, edellytykset tähteen talteenotolle paranivat. Ensinnä tulivat käyttöön kaksiotehakkuukoneet, jotka karsivat useita puita peräkkäin samassa työpisteessä ja jättivät niistä syntyneen tähteen suurille kasoille. Kaksiotehakkuukoneet korvautuivat pian kevyemmällä yksiotehakkuukoneilla, joitten jättämät tähdekasat ovat paljon pienempiä ja lukuisampia. Käytännöllisesti katsoen kaikki uudistushakkuut Suomessa ja Ruotsissa tehdään nykyisin yksiotehakkuukoneella.

Hakkuukoneen normaali työtekniikka tähtää siihen, että oksat ja karsimattomat latvakappaleet kerääntyvät ajouralle maan ja pintajuurien suojaksi hakkuukoneen ja kuormatraktorin aiheuttamilta painumilta. Suojamatto on tärkeä erityisesti harvennushakkuissa, mutta sillä on merkitystä myös heikosti kantavilla uudistusaloilla. Kun tähde näin polkeutuu maahan ja samalla likaantuu, talteenotto käy vaikeaksi. Tähteen joukkoon saattaa joutua kiviä, jotka aiheuttavat ongelmia hakkurissa sekä energialaitosten vastaanotto- ja kuljetusjärjestelmissä.

Jotta tähteen keruu helpottuisi, hakkuukoneen työskentelytekniikka tulee mukauttaa vastaavasti. Tähdekasoja suurennetaan ja polkeutuminen estetään, mikäli maan kantavuus sen sallii (kuva 19). Tähän päästään siten, että hakkuukone karsii rungot uran sivulla, ei siis uralla edessään. Aukkoa hakatessaan hakkuukone voi edetä leimikon reunan myötäisesti *yksipuoleista työskentelytekniikkaa* soveltaen, tai se voi edetä leimikon sisällä *kaksipuoleista työtekniikkaa* soveltaen. Tähdekasat jäävät vastaavasti joko vain toiselle tai kummallekin puolelle uraa (kuva 15).

Kun tähde on korkeilla polkemattomilla kasoilla, siihen on helppo tarttua kuormatraktorin tai palstahakkurin kouralla. Kuva 16 osoittaa, että talteenottoon mukautetut tekniikat todella jättävät tähteen tavanomaista korkeammille kasoille. Vakio-tekniikalla vain neljännes tähteestä jää paksuudeltaan yli 50 cm:n muodostelmiin, kun taas mukautetulla tekniikalla pääosa tähteestä saadaan keskitettyä yli 50 cm korkeille kasoille. Keruussa saavutettava kustannus- ja kertymähyöty ylittää hakkuukoneen tuottavuudessa ehkä kärsittävän menetyksen.



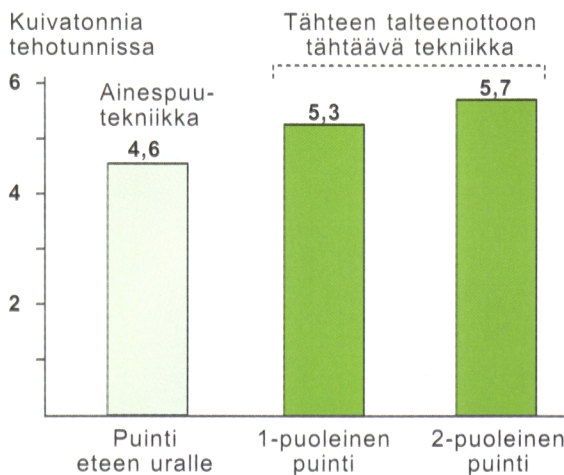
*Kuva 16. Työskentelytekniikan vaikutus hakkuutähteen kasautumiseen uudistus-
alalla (Nurmi 1994).*

Työskentelytekniikan vaikutusta hakkuukoneen tuottavuuteen on selvitelty useissa tutkimuksissa. Eräissä tapauksissa tuottavuus on kärsinyt tuskin lainkaan, mutta kun koneen kuljettaja on ollut tottumaton uuteen työskentelytapaan, tuottavuus on hieman alentunut (Nurmi 1994, Elonen & Korpilahti 1996). Ruotsissa, missä hakkuukoneen kuljettajat ovat jo sisäistäneet uuden tekniikan työssään, tuottavuuden on todettu alentuvan 2–4 % (Wigren 1991 ja 1992). Jos hakkuukoneelle maksetaan uudistushakkuussa ainespuun teosta 20 mk/m³, ruotsalaisten tulosten mukainen menetys tuottavuudessa edellyttää 40–80 pennin lisäkorvausta runkopuukuu-tiometrin hakkuutaksaan. Hakkuutähdehakkeelle siirrettynä kasauskustannus on tuolloin 1–2 mk/MWh eli 2–4 % hakkuutähdehakkeen kokonaiskustannuksesta käyttöpaikalla.

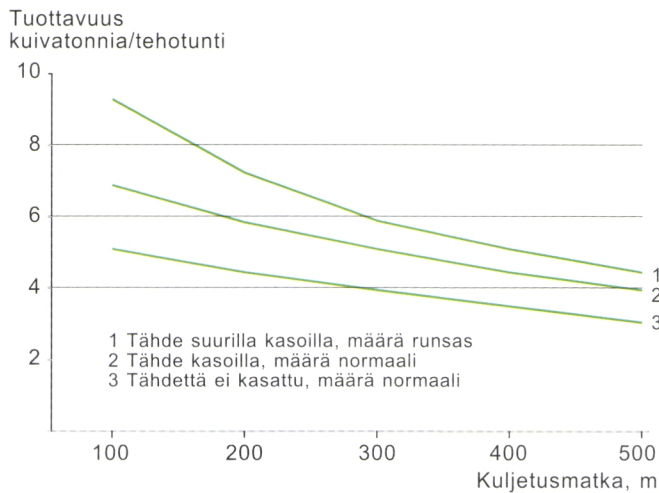
4.3 Tähteen kuljetus tien varteen

Palstahaketusmenetelmää lukuun ottamatta hakkuutähde kuljetetaan tien varteen hakettamattomana. Kuljetuksen suunnittelulla ja kuljetustekniikan valinnalla on tärkeä merkitys, sillä sekä Suomessa että Ruotsissa 20–25 % hakkuutähdehakkeen hinnasta käyttöpaikalla koostuu metsäkuljetuksen kustannuksista. *Tuottavuuteen ja kustannuksiin vaikuttavat* erityisesti seuraavat tekijät:

- *Tähteen esikasaus.* Sekä keruun ajanmenekin että tehokkaan talteensaannin ja tähteen puhtauden kannalta on välttämätöntä, että tähde jää hakkuukoneen jäljiltä talteenottoa edistävälle kasoille. Metsäkuljetusvaiheessa saatava säästö ylittää hakkuukoneen lisäkustannuksen selkeästi. Hakkuukoneitten käyttöönotto ja niiden työskentelytekniikan mukauttaminen energian tuotantoon ovatkin keskeinen syy metsähakkeen kustannusten alentumiseen 1990-luvulla (kuva 17).
- *Kuljetusmatka* kannolta tien varteen. Kun matka kasvaa 200 m:stä 400 m:iin, kuljetuksen tuottavuus laskee neljänneksellä ja yksikkökustannus kasvaa kolmanneksella (kuva 18). Niin kauan kun hakkuutähdeleimikoita on tarjolla ylimäärin, pitkän metsäkuljetusmatkan takana olevat leimikot eivät tule kysymykseen, vaikka ne luutaankin teknisesti korjuukelpoiseen hakkuutähdereserviin. Keskimääräinen kuljetusmatka on Suomen eteläpuoliskossa alle 300 m.



Kuva 17. Tähteen kasaustekniikan vaikutus metsäkuljetuksen tuottavuuteen 300 m:n ajomatalla. Vakiokokoisella kuormatilalla varustettu järeä kuormatraktori (Nurmi 1996b).



Kuva 18. Matkan vaikutus hakkuutähteen kuljetuksen tuottavuuteen tähteen runsaudesta ja kasauksen tehokkuudesta riippuen (Brunberg 1991, hakkeen irtokuutiometritilavuudet muunnettu kuivamassaksi suhdeluvulla $i\text{-m}^3 = 165 \text{ kg kuivamassaa}$).

- *Leimikon hakkuutähdetiheys* hehtaarilla. Metsäkuljetuksen ajankäytöstä noin 40 % kuluu tähteen kuormaukseen ja siihen liittyvään kuormausajoon. Mitä enemmän tähdettä on hehtaarilla, sitä juoheammin ja vähemmän pysähdyksin käy kuormaus. Tämä on keskeinen syy siihen, miksi talteenotto kohdistuu lähes yksinomaan kuusikoihin, sillä runkopuukertymään suhteutettuna hakkuutähteen kertymä on kuusikoissa männiköihin verrattuna jopa kaksinkertainen. Leimikoita valittaessa on kuitenkin muistettava, että lyhyempi autokuljetusmatka saattaa hyvinkin kompensoida vähäisen leimikkotiheyden aiheuttaman kallimman metsäkuljetuksen.
- *Tähdekuorman koko.* Hakkuutähteen ongelmana on vähäinen massatiheys ja siitä aiheutuva suuri kuormatilan tarve. Kuorman massa ei nouse lähellekään sitä tasoa, mihin ainespuun kuljetuksessa keskimäärin ylletään. Kun keskiraskaan metsätraktorin kuorma painaa tuoreella ainespuulla tavalarajista ja olosuhteista riippuen 7–11 tonnia, on se tuoreella hakkuutähteellä vastaavasti 4–5 tonnia ja hyvin kuivahtaneella tähteellä vain 2,5–3 tonnia, ellei kuormatilaan ole tehty muutoksia. Kuljetuskalusto tulee siis valita ja varustaa siten, että kuorman koko saadaan mahdollisimman suureksi.

Hakkuutähteen *metsäkuljetuksen perusratkaisuna on ainespuun korjuuseen suunniteltu kuormatraktori.* Mikäli tähteen kuljetustyö toistuu usein, metsätraktoriin kannattaa tehdä keveitä muutoksia. Ensimmäiseksi on kuitenkin ratkaistava, miten pitkälle ainespuun ja hakkuutähteen metsäkuljetus integroidaan (vrt. Asikainen 1995):

- Työmaitten välisistä konesiirroista aiheutuvia kustannuksia voidaan supistaa, jos ainespuu ja hakkuutähde kuljetetaan tien varteen *samalla traktorilla* samalla työmaakäynnillä. Edellytyksenä on, että ainespuun korjuuketjuun kiinnitetyn traktorin kapasiteetti riittää tähteellekin. Tämä logistiikka johtaa tähteen talteenottoon vihreänä eikä anna mahdollisuutta polttoaineen kuivattamiseen ja neulasten varisuttamiseen hakkuualalle.



Kuva 19. Hakkuukoneen tekemiä tähdekasoja (kuva Hannu Kalaja).

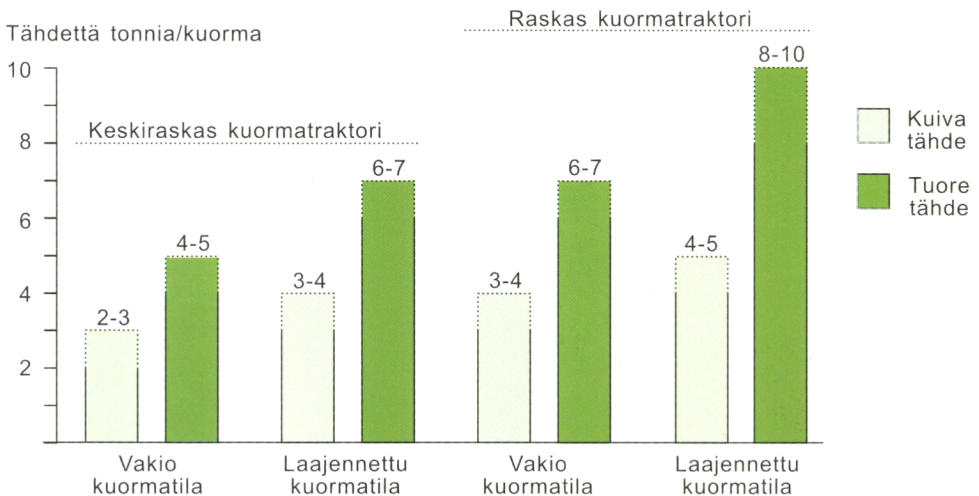


Kuva 20. Kuormatraktori tuomassa hakkuutähdettä tienvarsivarastoon (kuva Jaakko Miettinen).

- Jos hakkuutähteen kuljetukseen varataan ja varustetaan *erillinen traktori*, koneitten siirtokustannukset kasvavat mutta riippuvuus ainespuun korjuutahdistasta väljenee. Traktori voidaan mitoittaa nimenomaan tähteen kuljetukseen ja varustaa sitä varten lisälaittein. Erikoistraktorin käyttö muodostuu sitä tarkoituksenmukaisemmaksi, mitä yleisemmäksi tähteen talteenotto käy. Hakkuutähteen ja ainespuun kuljetusten ajankäytön suhde on uudistushakkuualoilla kuusikoissa 0,6–0,7/1 ja männiköissä 0,3–0,4/1. Voidaan arvioida, että yksi hakkuutähde-traktori kykenee, ainespuun korjuu harvennusleimikoistakin huomioon otettuna, keräämään tähteet 3–4 ainespuuta kuljettavan traktorin työmailta, vaikka lähes kaikki uudistushakkuualat tulisivat tähteen korjuun piiriin.

Tähteen kuljetuksen tuottavuuteen voidaan siis vaikuttaa leimikkovalinnoin, hakkuukoneen työskentelytekniikkaa mukauttamalla sekä kuljetuksen logistiikkaa terävöittämällä. Näitten metsäteollisuuden puunkorjuuorganisaation vallassa olevien ratkaisujen lisäksi myös yrittäjän itsensä ulottuvilla on tuottavuutta parantavia keinoja:

- *Metsätraktorin koko*. Tuottavuutta voidaan parantaa traktorin kokoa suurentamalla. Koska pääomakustannukset tulee pitää kurissa, käytetyt järeät kuormatraktorit ovat osoittautuneet tässä tehtävässä uusia taloudellisemmiksi. Kun toimitaan avohakkuuoloissa eikä traktori vajaakapasiteetillä työskennellessään altistu suurelle rasitukselle, vanhempikin järeä kalusto soveltuu tehtävään.
- *Kuormatilan suurentaminen*. Hakkuutähdekuorma on suurennettavissa traktorin tasapainon ja maastokelpoisuuden kärsimättä. Kuormatilaa voidaan sekä leventää että pidentää, mutta mitat tulee voida tarvittaessa palauttaa perusasentoon maantiellä ajamiseksi. Ruotsissa on käytössä ja Suomessakin kehitteillä myös puristuslaitteita, joilla kuorman massaa kasvatetaan tähdettä tiivistämällä.
- *Kuormaustekniikka*. Hakkuutähdekuorma pursuaa pankkojen ulkopuolelle kuin heinäkuorma. Tätä voidaan käyttää kuorman koon kartuttamiseen. Kuormaa voidaan leventää tähteen latvuskappaleilla, kun ne asetetaan kuormatilaan poikittain osin pankkojen ulkopuolelle töröttäen (kuva 20).



Kuva 21. Metsätraktorin järeiden ja kuormatilan sekä tähteen kuivumisen vaikutus kuorman massaan.



Kuva 22. Ruotsissa hakkuutähteen tienvarsivarasto peitetään talven varalle usein suojapaperilla, joka levitetään traktorin kuormaimesta riippuvan kehikon avulla. Traktorin kuormatilaa pidennetty (kuva Pentti Hakkila).



Kuva 23. Hakkuutähdekuorma maataloustraktorissa (kuva Seppo Ryyänen).

Hakkuutähdekuorman massaan vaikuttavat paitsi traktorin kuormatila myös tähteen koostumus, kuljettajan kokemus sekä maaston tasaisuus. Jos tuoreen tähteen sijasta kuljetetaan kuivahtanutta tähdettä, kuorman massa supistuu. Kuivuminen voi alentaa massaa jopa 20 % ja neulasten ja oksankärkien variseminen samoin 15–20 %, eikä kuivista oksista muutoinkaan muodostu yhtä tiivistä kuormaa kuin tuoreista (kuva 21).

Hakkuutähdettä voidaan kuljettaa tien varteen *myös maataloustraktorilla* (kuva 23). Tavaran luonteesta johtuen ongelmana ei ole niinkään tehon puute vaan kuormatilan ahtaus. Jos työtä on paljon, kuormatilaa kannattaa laajentaa samaan tapaan kuin metsätraktorilla. Myös kuormaimen ulottuvuus ja nostokorkeus vaikuttavat tuottavuuteen (Ryynänen 1997). Hakkuutähteen kuljetukseen varustettu paikallinen maataloustraktori loisi mahdollisuuden hankintakauppajärjestelmään, jonka puitteissa metsänomistaja tai maataloustraktoriyrittäjä myisi omista tai muitten metsistä tien varteen keräämäänsä hakkuutähdettä haketusyrittäjälle tai käyttäjälle tienvarsikasoille toimitettuna. Tällainen järjestelmä saattaisi ulottaa tähteen keruun entistä pienemmille uudistusaloille. Se antaisi hyvän mahdollisuuden kerätä tähteen tien varteen juuri silloin, kun kasat ovat kuivimmillaan ja maan kantokyky riittävä.

Karelian Puu ja Metalli on rakentanut maataloustraktoria varten levitettävän perävauunun ja hakkuutähdeharavan, jota voidaan tarvittaessa käyttää myös levällään olevan tähteen haravointiin (Ryynänen ja Mononen 1998). Vapon Kaikonsuon konepajalla on äskettäin valmistunut maataloustraktorivetoinen hakkuutähdeperävauunu, jonka umpilaidat kallistetaan levälleen kuormauksen ajaksi ja nostetaan hydraulisyntereitten avulla pystyasentoon kuorman täytyttyä. Ratkaisu kasvattaa kuorman massaa ja mahdollistaa *jatketun maantiekuljetuksen* haketusterminalille samalla ajoneuvolla.

Tuottavuuden ja kustannusten ohella myös *tähteen talteensaannin tarkkuus* on metsäkuljetuksen tehokkuuden kriteeri. Talteensaanti riippuu luonnollisesti myös hakkuukoneen jättämien kasojen koosta ja muodosta. Kuljetuksen kustannusten ja talteenoton tehokkuuden välillä on riippuvuussuhde. Kustannukset alenevat, kun tähteen kertymä (mittayksikkönä esimerkiksi tonnia/100 m ajouraa) kasvaa. Jos kertymää kuitenkin pyritään paisuttamaan liiallisen tarkalla talteenotolla, keruu hidastuu ja kustannukset alkavat kohota, ja samalla kasvaa vaara kivien ja muitten epäpuhtauksien joutumisesta tähdekuormiin. Käytännön työssä saadaan tähteestä talteen tienvarsikasoille yleensä seuraava osuus (Wigren 1990, Nurmi 1996b):

| | Talteen saatu osuus biomassasta, % |
|---|------------------------------------|
| — Hakkuukone käyttää perinteistä tekniikkaa eikä kasaa tähteitä | 55–60 |
| — Hakkuukone tähtää tähteen talteenottoon ja tekee kasausta | 65–80 |

Kun *tähteistä ajouralle muodostuva suojapeite häviää*, vaara maan painumisesta ja raiteutumisesta kasvaa. Kuljetus on ajoitettava huolellisesti, ja leimikon pehmeät paikat tulee jättää keruulta rauhaan. Metsätien säästämiseksi kuormat tulee tien varressa purkaa kasoille pääsääntöisesti metsän puolelta.

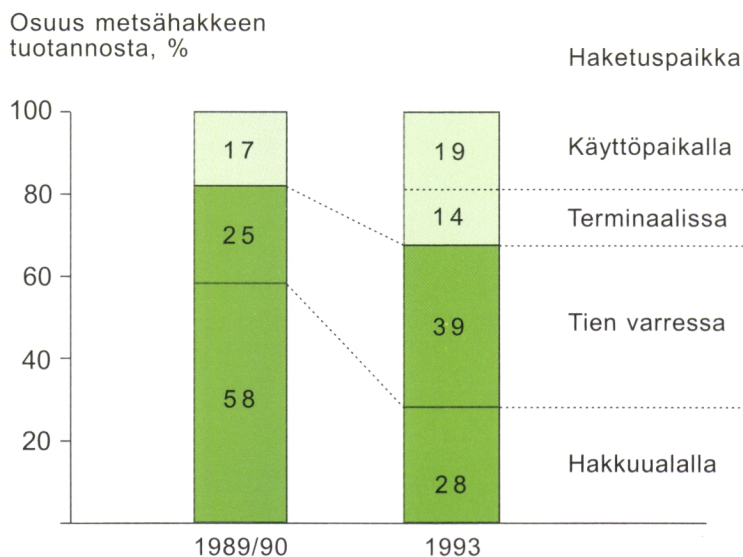
4.4 Tähteen hakettaminen

Käsittelyn, syötön ja polton automatisointi edellyttää, että hakkuutähdde saatetaan hakkeen tai murskeen muotoon. Häiriötön toiminta vaatii tasaista palakokojakaumaa, ja erityisesti pitkät tikut saattavat tuottaa ongelmia syöttölaitteissa. Peräti 30–35 % hakkuutähddehakkeen kokonaiskustannuksista aiheutuu haketuksesta.

On verraten yleinen käsitys, että tähteen hakettamiseen kuluva energiamäärä on tuotettavan hakkeen energiasisältöön verrattuna suuri. Käytännössä on todettu, että hakkurilta kuluu polttoainetta yksi litra, kun se tuottaa haketta yhden MWh:n edestä. Kulutus vastaa sadasosaa hakkeen energiasisällöstä. Vaikka hakkurityyppien välillä on energian kulutuksen suhteen eroja, niiden merkitys jää vähäiseksi, koska kulutustaso on alhainen (vrt. Heikka & Piirainen 1981).

Hakkurin ominaisuudet ja asema hankintaketjussa vaikuttavat ratkaisevasti koko korjuuketjun muotoutumiseen. Haketusmenetelmän ja hakkurin valinnan ratkaisevat suoritavoite ja sen jakautuminen vuoden eri vaiheisiin, raaka-aineen ominaisuudet, leimikko- ja varasto-olot sekä kuljetusetäisyydet. Hakkurin tulee soveltua paitsi hakkuutähteen myös kokopuuraaka-aineen ja sahateollisuuden tähteen hakettamiseen. Olosuhteista riippuen haketuspaikkoja voivat olla:

- hakkuuala eli palsta
- tienvarsi- eli välivarasto
- käsittelyterminaali
- käyttöpaikka



Kuva 24. Haketusvaiheen sijainti hakkuutähddehakkeen hankintaketjussa Ruotsissa (Brunberg & Hillring 1996).

Hakkuutähdehakkeen käytön edelläkävijämaassa Ruotsissa haketuksen painopiste on siirtynyt hakkuualalta tienvarsivarastolle, terminaalille ja käyttöpaikalle (kuva 24). Viime vuosikymmenen lopulla palstahaketuksen osuus oli Ruotsissa 60 % metsähakkeen tuotannosta, nyt enää 20–25 % (Trädbränsle 1997). Suuntauksen taustalla on pyrkimys hakevirran tehokkaampaan laadunhallintaan, kuumen korjuuketjun rauhoittamiseen, toimitusvarmuuteen kaikissa oloissa, kelirikko-ongelmien välttämiseen, konesiirtojen vähentämiseen ja hakkurin toiminnallisen käyttöasteen nostamiseen.

Palstahakkuri liikkuu ajouria myöten tähdekasalta toiselle ja hakettaa tähteen suoraan säiliöönsä. Palstahakkuri tyhjentää kuormansa maahan lasketulle vaihtolavalle tien varressa, tai se voi aikaa säästääkseen tyhjentää sen palstalla odottavaan kuljetustraktoriin. Tien varressa tapahtuvaan välivarastohakemukseen verrattuna palstahakemukseen liittyy seuraavia etuja ja haittoja:

- Palstahakkuri suoriutuu sekä haketuksesta että hakkeen kuljetuksesta tien varteen. Kun selviydytään kahden koneen sijasta yhdellä, saadaan aikaan säästöjä organisaation yleiskuluissa ja työmaitten välisissä konesiirroissa. Etu on suurin pienillä työmailla.
- Palstahakkuri ei vaadi tien varrella niin leveää tilaa kuin varastohakkuri, jonka tulee mahtua metsävarastolle tai -tielle hakeauton kanssa. Se vaatii kuitenkin tasaisen ja lujan alustan, jolle voidaan laskea useita sivulta täytettäviä hakekontteja.
- Palstahakkurilta edellytetään hyvää maastokelpoisuutta, ja siitä syystä sitä ei voida rakentaa järeydeltään ja tehokkuudeltaan varastohakkurin veroiseksi. Sovellusalue rajoittuu helppokulkuisille maille ja suhteellisen lyhyille kuljetustäisyyksille, sillä pitkillä yli 300 m:n matkoilla se on pienen hakesäiliönsä ja korkean hintansa vuoksi liian kallis kuljetuskone.
- Menetelmän käyttö on talviolloissa ongelmallista, jos tähdekasat peittyvät lumeen. Palstahakkuri toimiikin talvisaikaan tarvittaessa varastohakkurina.

Ensimmäiset palstahakkurit rakennettiin 1970-luvun alussa koneyrittäjä Pertti Szepaniaikin ja Työväline Oy:n yhteistyönä. Peruskoneena oli ensin maataloustraktori ja sittemmin metsätraktori, joissa sivusyöttöinen hakkuri sijaitsi tyypillisesti ohjaamon ja hakesäiliön välissä (Kalaja 1978). Metsähakkeen käytön lopahdettua 1980-luvulla palstahakkureitten valmistus katkesi vuosikausiksi Suomessa, mutta Ruotsissa se on jatkunut katkeamatta. Järein Ruotsissa valmistettava palstahakkuri on metsätraktorisovitteinen Bruks 1004 CT, jonka hakesäiliön tilavuus on 30 m³ ja hakkurin voimanlähteen teho 370 kW.

Tällä vuosikymmenellä suomalainen Oy Logset Ab on tuonut markkinoille uuden Chipset 536 C palstahakkurin, jonka erityispiirteitä ovat eteen sijoitettu rumpuhakkuri ja hakkeen siirto 15 m³:n säiliöön ohjaamon alitse (kuva 25). Syöttökulmaa voidaan kääntää ± 90°, mikä mahdollistaa hakettamisen uran kummaltakin puolelta yhdellä ajokerralla. Chipset hakkurin oma massa on 16 t ja kantavuus 6 t.

Palstahaketuksen tuottavuus on ruotsalaisten kokemusten mukaan 6–8 m³ (15–20 i-m³) käyttötuntia kohti (Brunberg 1991). Suomessa Chipset hakkurin tuottavuus on ollut seurantalutkimuksessa vastaavasti 7–8 m³ (18–20 i-m³) käyttötuntia kohti (Laurila 1997). Vuosikapasiteetti on noin 35 000 MWh (Nousiainen y.m. 1997). Haketuksen ja hakkeen lähikuljetuskustannus muodostuu lähes samaksi kuin järjestelmässä, jossa tähde kuljetaan tien varteen kuormatraktorilla ja haketaan järeällä kuorma-autosovitteisella varastohakkurilla.



Kuva 25. Chipset 536 C palstahakkuri (kuva Hannu Kalaja).



Kuva 26. Evolution R910 välivarastohakkuri (kuva Tommi Lahti).

Välivarastohakkuri ei joudu poistumaan tieltä tai varastoalueelta. Siksi se voidaan rakentaa palstahakkuria järeämmäksi ja voimakkaammaksi, mikä on hyödyksi nimenomaan hakkuutähdettä käsiteltäessä. Hakkuutähdetaakoissa oksat näet sijaitsevat sokin sokin, ja niitten esteetön kulku hakkurin teriin edellyttää avaraa syöttöaukkoa, mikä puolestaan johtaa raskaisiin hakkuri- ja syöttölaiteratkaisuihin. Sellaiset on helpompi sijoittaa varastohakkuriin kuin maastossa liikkuvaan palstahakkuriin.

Koska työmaat ovat yleensä pieniä ja samankin työmaan tähde hajallaan erillisillä kasoilla, välivarastohakkurilta edellytetään joustavaa liikkumista. Siksi järeät välivarastohakkurit ovat yleensä kuorma-autosovitteisia ja varustettu omalla kuormaimella. Laikkahakkurin sijasta suositetaan rumpuhakkuria, koska sen syöttöaukko on suurempi, mutta lisäksi tähde vaatii syöttöpöydän ja pakkosyöttörullat tai -telaston. Leikkaavan rumpuhakkurin sijasta voidaan käyttää myös iskevää murskainta, jossa ei ole kivistä vahingoittuvia teräviä teriä. Sekä rumpuhakkuri että murskain voidaan varustaa sisäisellä seulalla, joka estää ylisuurten hakepalasten synnyin.

Välivarastohakkuri puhaltaa hakkeen suoraan vieressä odottavaan autoon, perävaunuun tai maahan lasketuille konteille. Tästä saattaa aiheutua ongelmia tilankäytössä sekä aikataulutuksessa. Kun hakkurin ja hakeauton toiminnot on kytketty erottamattomasti yhteen, odotusajoilta ei voida välttyä. Niitten osuutta työmaa-ajasta voidaan kuitenkin supistaa huolellisella suunnittelulla, puhelinyhteyksillä ja huoltotoukojen tarkalla ajoituksella.

Siirrettävien hakkureitten markkinoita hallitsi viime vuosikymmenellä monipuolinen TT hakkurisarja, joka sisälsi sekä traktori- että autokäyttöistä kalustoa. Polttohakkeen käytön lamakauden ja yrityskauppojen seurauksena tuotanto kuitenkin romahti. Tällä hetkellä siirrettävän järeän hakkurikaluston valmistus on Suomessa paljolta koneyrityksien omilla harteilla. Konekehittäjässä on ansioitunut erityisesti Pekka Lahti Kotimaiset Energiet Ky kahdella autosovitteisella rumpuhakkurityypillä: Evolution R910 ja R9700 Future (kuva 26).

Välivarastohaketuksen tuottavuutta rasittaa myös siirtymiseen, ajoneuvojen väistämiseen, tien siivoamiseen, terien vaihtoon sekä auton odotteluun kuluva aika. Hankalan syötön vuoksi hakkuutähteen hakettaminen on hitaampaa ja kalliimpaa kuin pienpuusta koostuvan raaka-aineen. Käytännön työmaaseurannassa R 9700 Future hakkurin tuottavuus on ollut seuraava (Asikainen & Ikäheimo 1998):

| | Kokopuuhake | Hakkuutähdehake |
|---|-------------|-----------------|
| Tuottavuus, i-m ³ /tehotunti | 71 | 42 |
| Tuottavuus, i-m ³ /käyttötunti | 39 | 27 |

Haketustyötä voidaan järkipäristää, kun se siirretään palstalta ja välivarastolta puunkäsittelyterminaaliin tai käyttöpaikalle. Kuten edellä on todettu, Ruotsissa suuntaus vie kohti *keskitettyä hakettamista*. Kun metsähakkeen käyttömäärät kasvavat Suomessakin, saattaa keskittäminen tulla tarkoituksenmukaiseksi myös täällä. Ainakin Vapo Oy on rakentamassa hankintajärjestelmää, jossa hakkuutähde haketetaan turpeentuotantoalueitten tai voimalaitosten läheisyydessä sijaitsevista terminaaleissa. Saavutetaan esimerkiksi seuraavia etuja:

- Hakkuri syöttölaitteineen voidaan rakentaa järeäksi ja tehokkaaksi, kun sitä ei tarvitse siirrellä.
- Hakkurin käyttö tehostuu, kun vältytään siirtely- ja odotusajoilta.
- Hakkurin huolto ja hakkeen laadunvalvonta tehostuvat.
- Toimintavarmuus kasvaa ja biomassan säilyvyys ja kuivuminen paranevat, kun puskurivarasto keskittyy ja koostuu hakettamattomasta tähteestä.

Keskitetyn haketuksen ongelmana on kuitenkin hakettamattoman tähteen kaukokuljetus, joka suuren tilantarpeen vuoksi tulee etenkin pitkillä matkoilla hakkeen kuljetusta kalliimmaksi. Kun hakkuri on kiinteä, myös tähteen siirtely terminaalisissa aiheuttaa kustannuksia. Kuljetusmenetelmiä ja -kalustoa tulee kehittää, jolloin ratkaisua etsitään mm. tähteen puristamisesta ja paalaamisesta.

4.5 Hakkeen autokuljetus

Hakkuutähdehake tuodaan käyttöpaikalle lähes poikkeuksetta kuorma-autolla. *Autokuljetus on metsähakkeen tuotantoketjun kriittinen lenkki*, sillä myös hakkurin tuottavuus määräytyy osin autokuljetuksen toimivuuden ja ajoituksen ehdoilla. Sen välitön osuus hakkuutähdehakkeen kokonaiskustannuksista on keskimäärin 20–30 %, mutta se vaikuttaa välillisesti lisäksi haketuskuuluihin. Kun syntyy suuria käyttäjiä ja hankinta-alueet laajenevat, autokuljetuksen kustannusosuus kasvaa edelleen.

Metsähakkeen kuljetuskalusto on samanlaista ja osaksi samaakin kuin sahanhakkeen kuljetuksessa käytetty. Siltä vaaditaan kuitenkin selviytymistä kehnommilla varastopaikoilla ja metsäteillä. Hake puhalletaan autoon suoraan hakkurin hakeputkesta, joten erillistä kuormainta ei tarvita. Sen sijaan on auton kyettävä purkamaan kuormansa, mikä tapahtuu sivulle tai taakse kippaamalla tai taaksepurkavan ”kävelevän” lattian avulla. Pohjois-Amerikassa, missä sellutehtaat ottavat vastaan suhteellisen paljon hakemuotoista raaka-ainetta, on käytössä myös kippaavia alustoja, jollaisen päälle purettava auto ajetaan. Autolta ei tuolloin vaadita lainkaan omaa purkumekanismia, minkä ansiosta kuormakapasiteetti hieman kasvaa.

Suomessa hakeautot varustetaan täysperävaunulla, kun taas Pohjois-Amerikassa käytetään puoliperävaunuja. Täysperävaunun etuja ovat suurempi kuormakoko ja ketterämpi liikkuvuus mutkaisilla metsäteillä. Puoliperävaunun etuna on, että koko kuorma voidaan tehdä valmiiksi vetoauton poissa ollessa. Täysperävaunullisen auton kuormatilavuus on 110–130 m³. Uusilla eurorekkamitoilla voidaan päästä vieläkin suurempiin kuormatilavuuksiin, mutta sellaisen kaluston käyttö on vaikeata ahtailla varastoilla. Suuri kuormatilavuus mahdollistaa suurimman sallitun kokonaispainon saavuttamisen tuoreella hakkuutähdehakeella, mutta kuivahtaneella hakeella kuorma jää vajaaksi. Kuorman tiiviys ja massa kasvavat, jos hakkurin puhallusvoimaa lisätään.

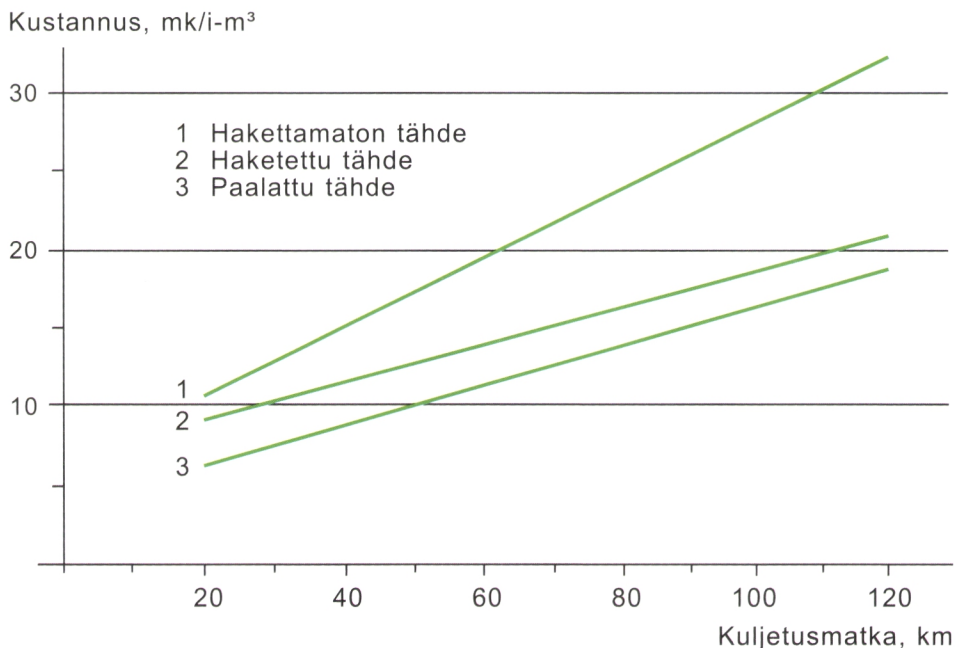
Palstahaketusketjussa hakeauto varustetaan vaihtokonteilla, joita täytettäessä auton ei tarvitse olla paikalla. Kontit supistavat hieman auton kuormatilavuutta, mutta koska palstahakkuri kykenee purkamaan hakekuormansa vain maahan lasketuille konteille, niiden käyttöä ei voida tässä järjestelmässä välttää. Palstahakkurin ja kuorma-auton aikataulujen riippuvuutta voidaan höllentää lisäkonttien avulla, mutta kontit vievät varastotilaa, vaativat tasaisen alustan ja merkitsevät myös lisäinvestointia. Muhoksen

Biokuljetus Oy on kehittänyt kasettikonttijärjestelmän, jossa perävaunullinen hakeauto voi tuoda työmaalle samanaikaisesti kuusi kooltaan 35 ja 40 m³:n konttia.

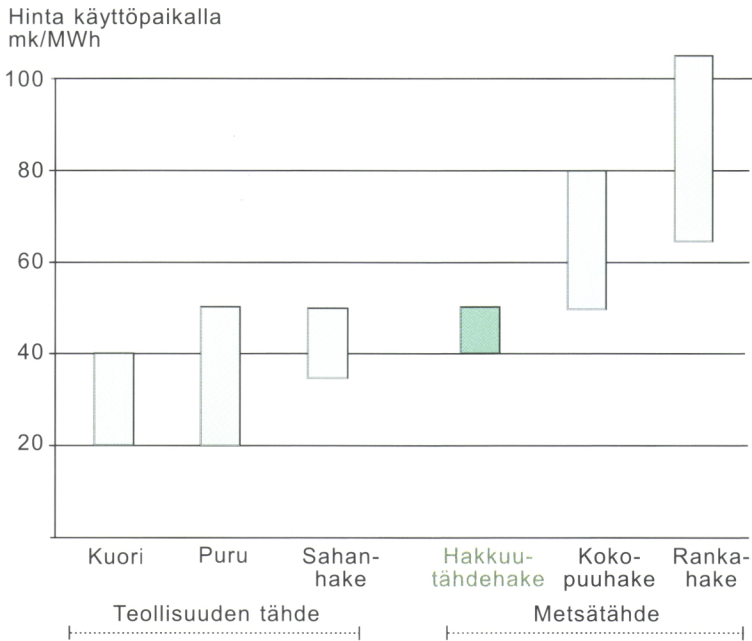
Haketustyön tuottavuus on hakkuutähteellä pienempi kuin kokopuulla. Perävaunullisen hakeauton tehollinen kuormausaika on välivarastohaketuksessa yleensä 2–3 tuntia. Lisäksi hakeauto saattaa joutua odottamaan vuoroaan. Kuormausvaiheesta hakeautolle aiheutuva kustannus on 10–13 mk/m³. Osittain tästä syystä on Suomessakin ryhdytty tutkimaan mahdollisuuksia katkaista hakkurin ja kuorma-auton vaikeasti hallittava riippuvuussuhde keskittämällä haketus terminaaliin tai käyttöpaikalle.

Kun haketus keskitetään, joudutaan hakkeen sijasta kuljettamaan hakettamatonta tähdettä, jolloin kuorman massatiheys alenee. Sitä voidaan torjua hydraulisilla puristuslaitteilla, joita käytettäessä tähdekuorman massa kasvaa 20–40 %. Toinen vaihtoehto on tähteen paalaus, jonka avulla päästään yhtä suuriin kuormiin kuin hakkeella. Haketuksen keskittämisestä ja kuumasta koneketjusta vapautumisesta koituu niin merkittäviä etuja, että koko hankintalogistiikka on erityisesti Ruotsissa ollut uudelleenarvioinnin kohteena, ja runsas kolmannes haketuksesta on jo siirtynyt metsäpäästä terminaaleihin ja käyttöpaikoille.

Kuva 27 osoittaa hakkuutähdehakkeen, irrallisen hakkuutähteen ja pyöröpaalatun hakkuutähteen autokuljetuskustannuksen Ruotsissa. Hakkeen kuljetuskustannus on oleellisesti alhaisempi kuin hakettamattoman tähteen, ja kustannusero kasvaa nopeasti matkan myötä. Sen sijaan paalatun tähteen kuljetus on halvempaa kuin hakkeen, koska kuorman koko on kummallakin sama mutta kuormausaika paaleilla lyhyempi ja hakkurin toiminnasta riippumaton.



Kuva 27. Hakkuutähdehakkeen, irrallisen tähteen ja paalatun tähteen autokuljetuskustannus Ruotsissa hakkeen irtokuutiometriä kohti (Brunberg 1998).



Kuva 28. Lämmityslaitosten puupolttoaineista maksama arvonlisäveroton hinta käyttäjäkyselyn mukaan vuonna 1995 (Hakkila & Fredriksson 1996).

4.6 Hakkuutähdehakkeen kustannukset

Hakkuutähdettä on saatavilla energiakäyttöön runsain mitoin, eikä siitä toistaiseksi ole varaa eikä tarvitse maksaa kantohintaa. Talteenottoon on tarjolla tehokkaita koneyhdistelmiä ja hankintajärjestelmiä, joitten toimivuus ja luotettavuus on osoitettu käytännön työskentelyssä. Vaikka useilla suurilla energialaitoksilla on tekninen valmius hakkuutähdehakkeen polttoon, käyttö on potentiaaliin nähden kuitenkin vaatimatonta.

Ongelmana on edelleen kustannuskilpailukyky erityisesti turpeen vaihtoehtona. Hakkuutähdehake on kustannuksiltaan kyllä selvästi edullisempaa kuin pienpuusta tehty kokopuu- ja rankahake, mutta kustannukset ovat korkeammat kuin teollisuuden prosessitähteen (kuva 28). Viimeksimainittu on kuitenkin lähes kokonaisuudessaan jo käytön piirissä, ja siksi hakkuutähdehake ympäristöystävällisenä polttoaineena on alkanut kiinnostaa suuriakin energialaitoksia turpeen ja kivihiilen vaihtoehtona.

Kustannusten hallinnan kannalta keskeinen tekijä on *hankintalogistiikan toimivuus*. Viime vuosina saavutetut kustannussäästöt ovat paljolta juuri logistiikan hioutumisen pikeminkin kuin koneteknisten ratkaisujen ansiota. Tärkeitä näkökohtia ovat esimerkiksi:

- Hankintaketjun peräkkäisten työvaiheitten ja koneitten riippumattomuus toistensa työtahdistista
- Konekapasiteetin mitoittaminen hankintatehtävän mukaisesti ja ketjun koneitten kapasiteetin yhteensopivuus
- Koneitten työskentelyaikataulujen yhteensovittaminen ja huoltotehtävien ajoit-

- taminen odotustilanteisiin
- Tuotannon jakautuminen mahdollisimman tasaisesti ympäri vuoden ja sitä helpottavien puskurivarastojen varaaminen
- Koneitten ja kuljettajien täystyöllisyyden varmistaminen
- Leimikoitten keskittäminen ja tarpeettomien koneisirtojen välttäminen
- Polttohakkeen laatuäköhtien huomioon ottaminen ja hallinta ketjun kaikissa vaiheissa

Päinvastoin kuin ainespuulla, polttohaketta hankittaessa koko ketju kannolta käyttöpaikalle on usein *saman kone- ja kuljetusyrittäjän kokonaisurakoinnin kohteena*. Tämä on tärkeää erityisesti siksi, että haketuksen ja autokuljetuksen väliin pyrkii jäämään herkästi haavoittuva saumakohta, joka tulee olla saman toimittajan vastuulla ja hallinnassa. Kun tuotannosta maksettava korvaus kytketään hakkeen lämpöarvoon, yrittäjä voi parantaa kannattavuutta myös hakkeen kosteutta alentamalla, kun hänen hallussaan on koko toimitusketju.

Korjuukohteitten valinta tulee tehdä kustannusvertailun perusteella. Leimikkokohtaisten työvaikeustekijäin huomioon ottaminen käy sitä tärkeämmäksi, mitä suurempia määriä ja mitä laajemmalta hankintasäteeltä tähdettyä ryhdytään toimittamaan. Kustannustekijöitä ovat esimerkiksi leimikon kokonaiskertymä, kertymä hehtaarilta, metsäkuljetusmatka, autokuljetusmatka sekä tienvarsivaraston tilat ja kantavuus. Valintaan vaikuttavat tietenkin myös kasvupaikan kantavuus ja ekologiset rajoitteet, käytettävissä oleva konekalusto, mahdollisuus leimikkokeskitysten hyväksikäyttöön sekä metsänomistajan toivomukset.

Hakkuutähdehakkeen tuotannon kustannukset ja kustannusrakenne vaihtelevat olosuhteista ja toimittajasta riippuen suurestikin. Taulukko 6 antaa kuvan tehokkaan korjuuketjun kustannustasosta ja -jakaumasta Ruotsissa (Brunberg 1998) ja Suomessa. Vaikka korjuuolosuhteet tuskin ovat Suomessa ainakaan edullisemmat kuin Ruotsissa, kustannustasomme on kaikissa työvaiheissa oleellisesti alhaisempi. Ruotsissa hakelämpöläitokset kykenevät fossiilipolttoaineitten korkean hinnan seurauksena maksamaan hakkeesta metsänomistajalle kantorahaakin.

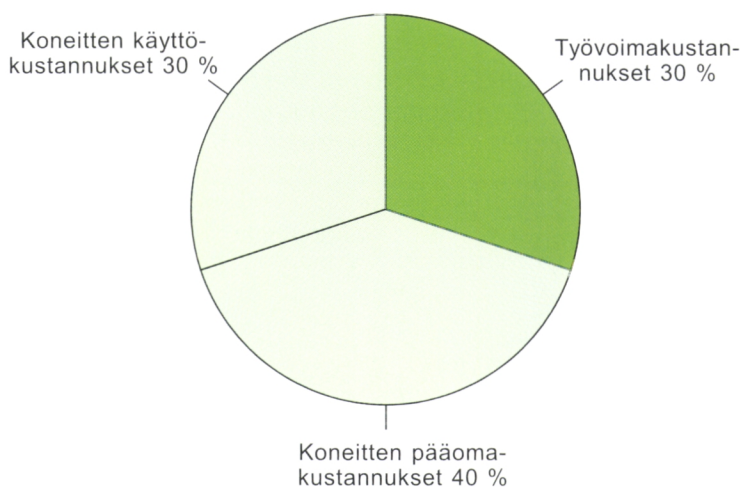
Taulukko 6. Hakkuutähdehakkeen kustannustaso ja -rakenne Suomessa ja Ruotsissa vuonna 1997. Suuntaa-antava esimerkki tehokkaasta väli-varastohaketuksen perustuvasta ketjusta.

| Kustannuslaji | Suomi | Ruotsi |
|-----------------------------|------------------------------------|--------|
| | Kustannustaso, mk/i-m ³ | |
| Hakkuu | 1 | 1 |
| Metsäkuljetus | 10 | 15 |
| Varastointi, suojapaperit | 0 | 4 |
| Haketus tien varressa | 14 | 24 |
| Autokuljetus 50 km | 10 | 12 |
| Yleiskulut, yrittäjän riski | 5 | 10 |
| Metsänomistajan kantohinta | 0 | 7 |
| Yhteensä | 40 | 73 |

Koska hakkeen maksuperusteena on yleensä lämpösisältö eikä irtokuutiometritilavuus, myös hakkeen kosteus on kustannustekijä. Ruotsissa kustannuksiin sisältyy muun muassa varastokasojen ylle levitettävä suojapaperi, ja sen käyttö katsotaan kannattavaksi. Kustannusvertailussa onkin huomattava, että Ruotsissa hakkeella lienee kuivatuksen ansiosta keskimäärin hieman korkeampi lämpöarvo kuin Suomessa.

Hakkuutähdehakkeen tuotantokustannus oli 1980-luvun alkupuolella 52 mk/MWh (Hakkila 1984) eli nimellisarvoltaan korkeampi kuin tällä hetkellä. Suotuisa kustannuskehitys on paljon seurausta metsätalouden toimintaympäristön muutoksesta sekä suurien käyttökohteitten avautumisesta. Kustannussäästöä on viime vuosina syntynyt muun muassa seuraavien muutosten kautta:

- *Hakkuutyö on koneellistunut* uudistusaloilla lähes täydellisesti. Hakkuukoneitten käyttö helpottaa tähteen talteenottoa.
- Ruotsissa on kehitetty tähteen talteenottoon tähtävä *hakkuukoneen työskentelytekniikka*, niin että erillistä tähteen kasausta ei enää tarvita. Tämä tekniikka on siirretty myös Suomeen (Nurmi 1994).
- *Koneyrittäjien kilpailuttaminen* on 1990-luvulla laskenut ainespuun korjuukustannukset alemmiksi kuin ehkä missään muussa teollistuneessa maassa. Vuodesta 1991 vuoteen 1996 ainespuun korjuukustannus kannolta tien varteen aleni runsaat 20 % ja puutavaran kaukokuljetuskustannus lähes 30 % (Oijala ym. 1997). Tämä kehityskulku ei ole ollut vaikuttamatta metsähakkeenkaan korjuukustannuksiin.
- *Suuruuden ekonomian lain* mukaisesti kustannukset ovat laskeneet myös sen ansiosta, että hakkuutähdehakkeen hankintamäärät ovat kasvaneet. On tullut mahdolliseksi ottaa käyttöön ja työllistää entistä tehokkaampaa kalustoa.
- *Hankintaketjun logistiikka* on kehittynyt kokemuksen ja ammattitaidon karttuessa. Tämä on supistanut koneitten odotusaikoja, työmaitten välisiä konesiirtoja ja kuljetusmatkoja sekä kasvattanut koneitten toiminnallista käyttöastetta.
- *Koneitten tekninen kehittyminen* on vaikuttanut kustannustason laskuun vain vähän, sillä se on viime vuosina rajoittunut lähinnä hakkureihin. Autokuljetuskustannuksia on alentanut kaluston kantavuuden kasvu, kun perävaunullisen kuorma-auton suurin sallittu kokonaismassa on noussut 60 tonniin.



Kuva 29. Hakkuutähdehakkeen hankintakustannusten jakautuminen työvoima-, käyttö- ja pääomakustannusten kesken.

Hakkuutähdehakkeen tuotanto on sangen pääomavaltaista. Vain noin 30 % kustannuksista koostuu koneen- ja autonkuljettajien palkoista sivukuluineen. Kaluston pääomakulujen osuus on noin 40 % ja käyttökulujen 30 % (kuva 29). Viimeksi mainittuja aiheuttavat lähinnä poltto- ja voiteluaineet, hakkurin terät, huollot, korjaukset, vakuumukset jne.

Korkeasta tuottavuudesta ja pääomavaltaisuudesta seuraa, että hakkuutähdehakkeen tuotannon *välitön työllistävä vaikutus* on pienempi kuin pienpuusta tehdyn hakkeen. Esimerkiksi 1 miljoonan m³:n (2,5 milj. i-m³) vuosituotannon synnyttämä palkkasumma sivukuluineen on noin 30 milj. mk, mikä vastaa noin 150 työvuotta hakkeen hankinnassa. Työtä syntyy toki myös koneenrakennuksessa, huollossa ja käyttöpaikalla, ja huomioon on otettava myös välillinen työllisyysvaikutus.

4.7 Vaihtoehtoisia hankintajärjestelmiä

Luvuissa 4.1–4.6 kuvataan Suomessa ja Ruotsissa yleisessä käytössä olevaa hakkuutähdehakkeen tuotantotekniikkaa. Se on tehokasta, luotettavaa ja kustannuksiltaan edullista, ja se sopeutuu kitkatta koneellisen puunkorjuun kokonaisuuteen ja logistiikkaan.

Nykyinen tekniikka on pohjimmiltaan peräisin 1980-luvun alkupuolelta, joskin se polttihakkeen kysynnän tyrehtyttyä oli välillä pois käytöstä. Hakkuun koneellistamisen ohella viime vuosien kehitys on ollut lähinnä koneteknisten ratkaisujen siinänsä tärkeitä hienosäätöä. Yleensä on tyydytty vain hankintaketjun tietyn osavaiheen tehostamiseen, mutta itse järjestelmää ei ole muutettu. Tutkimus- ja kehitystyön kohteena on kuitenkin myös järjestelmäänkin ulottuvia ratkaisuja, jotka puun energiakäytön laajentuessa ja toimintaympäristön muuttuessa saattavat osoittautua kilpailukykyisiksi vaihtoehtoiksi nyt käytössä oleville. Seuraavassa esitetään kolme uutta hakkuutähdehakkeen hankintajärjestelmää, jotka ovat kiintoisia erityisesti logististen etujensa ansiosta.

Kokopuun laahusuontoon perustuva järjestelmä

Ainespuun korjuu perustuu Suomessa *tavaralajijärjestelmään*, jossa puitten karsinta ja katkonta puutavaralajeiksi tehdään jo hakkuualalla ja puutavara kuljetetaan tien varteen kuormaakantavalla traktorilla. Tämän järjestelmän pohjois-amerikkalainen vaihtoehto on *kokopuu- tai kokorunkojärjestelmä*, jossa karsimattomat kokopuut tai karsitut rungot kuljetetaan tien varteen laahusuontotraktorilla vetäen siten, että taakan tyvipää on kannatuksella mutta latvapää laahaa maassa. Katkonta tavaralajeiksi tapahtuu joko tien varressa, terminaalissa tai käyttöpaikalla.

Koska latvusmassa on ainespuuhun verrattuna vähäarvoinen raaka-aine, ainespuun ja polttopuun integroitu korjuu tullaan vastaisuudessa toteuttamaan ainespuun ehdoilla. Lankeaa luonnostaan, että tähteen talteenoton lähtökohtana on Suomessa ollut tavaralajimenetelmä ja siihen liittyen puitten karsinta hakkuualalla ennen metsäkuljetusta, jolloin latvusmassa jää ainespuuta korjattaessa hakkuualalle. Kokopuujärjestelmässä tähde sen sijaan kulkeutuu tien varteen rungon mukana.



Kuva 30. Kokopuujuonto Asennusliike Kannonkone Oy:n puristuspankolla varustetulla Sisu 838 kuormatraktorilla (kuva Ismo Nousiainen).

Kokopuujärjestelmää kokeiltiin Suomessa ainespuun korjuussa 1960-luvulla, mutta se hylättiin pienikokoisille puille ja harvennuksiin soveltumattomana sekä väljiä varastiloja vaativana. Mutta voisiko se sittenkin soveltua uudistushakkuisiin, kun tavoitteeksi asetetaan myös latvusmassan hyödyntäminen? Samalla olisi ehkä mahdollista siirtää järeitten runkojen pölkyttäminen sahalaitoksille ja hyödyntää rungon laatu-potentiaali entistä tarkemmin!

VTT Energia on tutkinut kokopuujärjestelmän soveltuvuutta runkopuun ja latvusmassan integroituun korjuuseen (Nousiainen & Vesisenaho 1996, Vesisenaho & Liukkonen 1997). Leimikkokohteille on silloin asetettu ankaria rajoituksia, niin että kysymykseen voisivat tulla vain järeäpuustoiset, tien välittömässä tuntumassa sijaitsevat kuusivaltaiset päätehakkuaalat. Ehdot täyttävien leimikoitten arvioidaan esimerkiksi Jyväskylän seudulla kattavan 10–15 % runkopuun hakkuukertymästä. Leimikot ovat pääosin kesäkorjuukohteita, jolloin laahusuonnon rasitteina saattavat olla latvusmassan likaantuminen sekä raiteenmuodostus ajourilla.

VTT Energian tutkimushankkeessa on katsottu, ettei kokopuunakorjuuta varten voida varata kallista erikoiskalustoa, vaan on tultava toimeen käytössä olevalla yleiskalustolla. Poikkeuksena on *kuormatraktorin päälle laahustaakkakuljetuksen ajaksi lisälaitteeksi asennettava puristuspankko* (kuva 30). Työketju kannolta tien varteen voisi olla tuolloin seuraava: puitten kaato ja kasaus juontotaakoiksi yksiotehakkukoneella, taakkojen veto tien varteen irrotettavalla puristuspankolla varustetulla kuormatraktorilla, karsinta ja katkonta suoraan tienvarsipinoihin samalla yksiotehakkukoneella sekä tähteen hakettaminen palstahakurilla.



Kuva 31. Hakkuutähteestä tehtyjä pyöröpaaleja Skotlannissa (kuva *Barrie Hudson*).

Kenttäkokeitten perusteella kokopuujärjestelmä saattaa tuottaa kustannussäästöjä yksittäisissä leimikkokohteissa. Toisaalta kuitenkin kokopuita juontavan puristuspankkotraktorin sekä tien varrella työskentelevän hakkuukoneen toiminnot kytkeytyvät kiinteästi toisiinsa, mikä saattaa luoda ongelmia. Suuri varastotilan tarve, puutavaramateriaalien erottelu sekä latvusmassan hävikki tien varressa nakertavat järjestelmän kilpailukykyä, jos sen käytön ainoa hyöty liittyy hakkuutähteen talteenottoon. Mutta jos sillä samanaikaisesti mahdollistetaan järeän puun hankinta kokopuina tai tukkiosina ja siirretään apteeraus otollisempiin oloihin sahalle, järjestelmän kilpailukyky paranee.

Tähteen paalaukseen perustuva järjestelmä

Ainespuun korjuun kehittelyyn on liittynyt työn siirtäminen metsästä edullisempiin oloihin terminaaliin ja käyttöpaikalle. Näin on voitu alentaa kustannuksia ja tehostaa laadun hallintaa.

Ruotsissa tämä kehityssuunta heijastuu hakkuutähteen korjuussa siten, että hakettaminen siirtyy yhä useammin lämpölaitokselle. Keskitetyn haketuksen ongelmaksi muodostuu kuitenkin hakettamattoman tähteen kaukokuljetus, kun alhainen massatiheys johtaa kaluston vajaakäyttöön. Ratkaisua on etsitty kuorman tiivistämisestä puristamalla, mutta tulokset eivät ole olleet täysin tyydyttäviä.

Toinen vaihtoehto on *tähteen muokkaaminen tiiviiksi paaleiksi tai nipuiksi* (kuva 31). Niillä tähdätään paitsi suurempaan kuormakokoon myös muihin, läpi koko hankintaketjun vaikuttaviin logistisiin etuihin tähteen käsittelyssä, kuljetuksessa ja varastoinnissa. Edut ovat suurimmillaan silloin, kun paalataan jo hakkuupaikalla:

- Korjuujärjestelmä saa joustavuutta, sillä paalatun ja niputetun raaka-aineen virta voidaan ilman käsittely- ja varastointivaikeuksia katkaista tai suunnata uudelleen missä tahansa ketjun vaiheessa. Siirto autosta varastoon tai vaikkapa juunaan yksinkertaistuu.
- Kuljetus tehostuu: kuorman koko kasvaa ja kuormausta ja purkamista nopeutuvat. Vapaudutaan kuumasta ketjusta, kun hankintaketjun eri vaiheitten toiminnot eivät ole kiinteästi sidoksissa.
- Varastointi helpottuu: tilan tarve supistuu, kuivuminen ja säilyminen pysyvät hyvinä.
- Haketus helpottuu: kustannukset alenevat ja hakkeen laadunvalvonta tehostuu.
- Raaka-ainehävikki ketjun eri vaiheissa supistuu, ja vältetään ympäristön roskaantumisen.

Paaleilta vaaditaan lujuutta, kun niitä kuljetetaan ja varastoidaan päällekkäin korkeissa muodostelmissa. Siksi paalien ympärille tarvitaan polttoon kelvollista sidelankaa tai kääriinpeitettä.

Tiivistys-, niputus- ja paalaustekniikkaa on kehitelty useissa maissa. Sitä koskeva hanke sisältyy myös VTT Energian puubiomassan tuotannon tutkimukseen (Kai-painen 1997). Lähimmäksi käytännön sovellusta on päästy Ruotsissa, missä Bala Press Ab on kehittänyt maatalouden heinä- ja olkipaalaimesta hakkuutähteelle tarkoitetun 10 tonnia painavan järeytetyn mallin. Laite asennetaan autoon tai kuormatraktoriin, jonka kuormain soveltuu sekä paalaimen syöttämiseen että valmiitten paalien siirtelyyn.

Bala Press Ab:n paalain työskentelee joko hakkuualalla tai tienvarsivarastolla. Se kykenee käsittelemään yhtä hyvin kuivaa kuin tuorettakin tähdettä selviytyen oksien lisäksi myös latvoista. Tuloksena on läpimitaltaan ja paksuudeltaan 120 cm:n pyöröpaali, jonka ympärille on kiedottu verkko. Tuoreella sitkankuusen hakkuutähteellä paalin massatiheys on noin 400 kg/m³ eli hieman korkeampi kuin hakkeella. Tähde kuivuu ja säilyy pyöröpaaleissa hyvin, niin että vuoden jatkuneessa varastoinnissa on päästy jopa 20 %:n kosteuteen (Andersson & Hudson 1998).

Paalaukseen perustuva hakkuutähdehakkeen hankintajärjestelmä avaa mahdollisuuksia hankinta-alueen laajentamiseen jopa junakuljetuksin. Järjestelmä *helpottaa puskurivarastointia* hankintaketjun kaikissa vaiheissa ja vahvistaa siten toimintavarmuutta. Paalaus on tulossa käyttöön Ruotsissa, mutta Suomen hintatasolla paalaustyön ja verkkomateriaalin kustannukset ovat toistaiseksi liian korkeat. Edut ovat joka tapauksessa niin merkittäviä, että on perusteltua panostaa järjestelmän tekniseen kehittelyyn myös Suomessa.

Haketuksen ja autokuljetuksen yhdistämiseen perustuva järjestelmä

Ainespuun korjuulogiikassa vältetään perinteisesti kuumaa ketjua, jossa peräkkäiset työvaiheet on sidottu kiinteästi toisiinsa. Palsta- ja välivarastohaketukseen perustuvaan hakkeen tuotantoketjuun syntyy kuitenkin tällainen häiriöherkkä vaihe hakkurin ja hakeauton välille, sillä haketta ei voida varastoida kasoille, vaan se on kuormattava hakkurista suoraan autoon, perävaunuun tai vaihtolavalle.

Hakkurin ja hakeauton toiminnat on sovittava yhteen niin, että tarpeettomilta odo-
tusajoilta vältytään. Tämä ei ole aina mahdollista, varsinkin kun haketuksen tuotos
vaihtelee raaka-aineen ja olosuhteitten mukaan, ja kuljetuksen tuotos vaihtelee mat-
kasta ja tien laadusta riippuen. Ongelmia aiheuttavat myös välivarastohakkurin ja ha-
keauton yhtäaikainen sijoittaminen ahtaalle varastoalueelle tai metsätielle, samoin kuin
palstahakkurin hakekonttien vaatiman tasaisen alustan löytäminen.

Ongelmat ratkeavat, kun *haketus ja hakkeen kuljetus tehdään samalla koneella, hak-
kurikuorma-autolla*. Odotuksilta vältytään, tullaan toimeen ahtaillakin varastopaikoilla,
ja koneitten siirtely työmaitten välillä vähenee.

Ensimmäinen hakkurikuorma-auto rakennettiin 1980-luvun alussa Pertti Szepaniak
Oy:n ja Oy Veho Ab:n yhteistyönä Metsäntutkimuslaitoksen PERA-projektin puitteis-
sa. Sen komponentteja olivat Mercedes Benz Unimog U 1700 L maastokuorma-auto,
ajoneuvon eteen kiinnitettävä irrotettava kartiohakkuri, puutavarakuormain, vaihtola-
vajärjestelmä 13 m³:n kontteineen sekä perävaunu. Kokemukset osoittivat, että oli
mahdollista luopua kuumasta ketjusta. Prototyypilaitteen kustannuskilpailukyky ei
kuitenkaan ollut riittävä, mihin vaikuttivat muun muassa pieni 40m³:n kuormakoko
sekä uudentyyppisen hakkurin tekniset ongelmat (Schildt 1982).

Metsäenergia MetEr Ky rakensi vuonna 1995 MOHA hakkuriauton, joka toimii sekä
haketus- että kuljetusyksikkönä (kuva 32). Sen peruskoneena on SISU SM 312 CKS
6x6 raskas maastokuorma-auto, joka on varustettu SISU metsätraktorin ohjaamolla.
Kuormain ja sivusyöttöinen rumpuhakkuri on sijoitettu ohjaamon ja 35 m³:n hake-
kontin väliin. Yhdistelmään kuuluu hakekontin kantava perävaunu, jolle kontti työn-
netään peruskoneen päältä vaihtolavan siirtomekanismin avulla. Perävaunua käytet-
täessä kuormakapasiteetti on 70 i-m³ haketta.



Kuva 32. MOHA hakkuriauto (kuva Hannu Kalaja).



Kuva 33. Hakkuutähteen keruun jälkeen äestetty uudistusala (kuva Pentti Hakkila).

Alustakoneensa ansiosta hakkuriauto kykenee työskentelemään myös huonoilla teillä, heikosti kantavilla varastoalueilla ja jopa helppokulkuisessa metsämaastossa. Sen ilmeisiä etuja ovat *riippumattomuus hankintaketjun muista vaiheista*, vapautuminen hakkurin siirroista ja siirtojen valmistelusta sekä pääsy pienille ja ahtaille varastoalueille, mikä lisää korjuukelpoiseksi luokiteltavan hakkuutähteen määrää. Hakkuriauto soveltuu hyvin olosuhteisiin, joissa sama yrittäjä toimittaa haketta useille lämpölaitoksille verraten lyhyiltä etäisyyksiltä (Hämäläinen 1995, Hämäläinen & Pankakari 1996). Sen kustannuskilpailukyky ei liene yhtä hyvä suurten laitosten hakkeen toimittajana, jolloin auton kuormakoon tulisi olla mahdollisimman suuri.

Vuonna 1997 tehdyn seurantatutkimuksen aikana MOHA hakkuriauto toimitti haketta viidelle itäsuomalaiselle lämpölaitokselle keskimäärin 21 km:n ajomatkalta. Ajankäytön jakauma oli seuraava: haketustyö 31 %, ajo maantiellä ja maastossa 41 %, ajankäyttö lämpölaitoksella 9 %, huolto ja korjaukset 12 % sekä muu ajankäyttö 7 %. Varsinaisessa haketustyössä tuottavuus oli hakkuutähteellä 15 m³/h (38 i-m³/h) ja pienellä kokopuulla 26 m³/h (65 i-m³/h). Koko seurantajakson aikana haketta valmistui ja toimitettiin lämpölaitoksille 5,6 m³/h eli 14 i-m³/h. Järjestelmä todettiin näissä oloissa kilpailukykyiseksi käytössä oleviin palsta- ja välivarastohaketusjärjestelmiin verrattuna. Matkan pidentyessä kilpailukyky kuitenkin heikentyy (Asikainen & Ikäheimo 1998).

5 Tähteen talteenoton seurannaisvaikutukset metsätaloudessa

5.1 Tähteen poistamisen vaikutus maan ravinnevaroihin

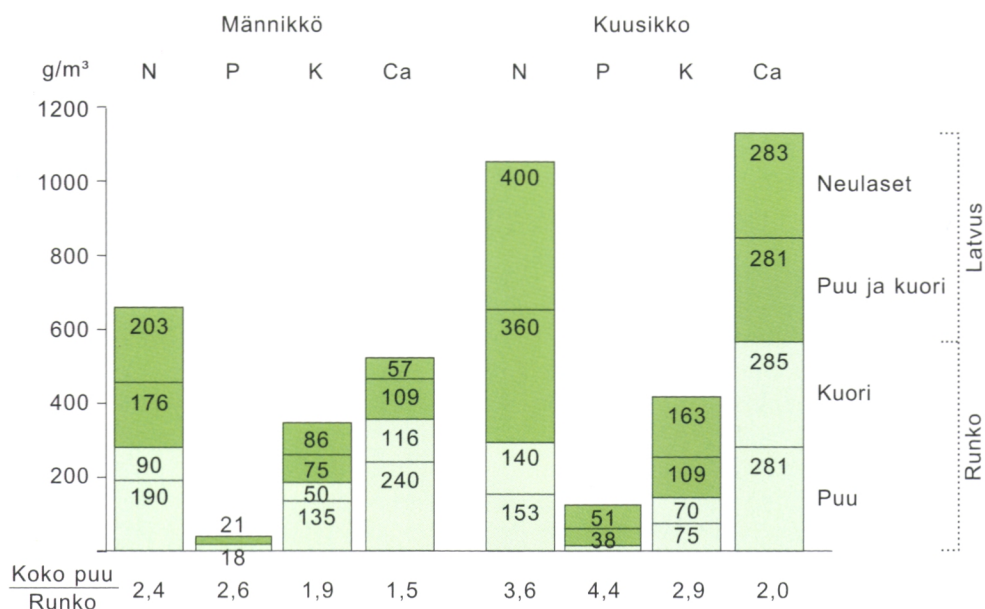
Puubiomassan energiakäytön painavimmat ja pysyvimmat perusteet ovat ympäristölähtöisiä. Siksi menetelmäkehittämissä ja suunnittelussa on kiinnitettävä asian erityistä huomiota ympäristönäkökohtiin. Ei ole kestävä kehityksen periaatteen mukaista hankkia ympäristöhyöty yhtäällä ja aiheuttaa vakava ympäristöhaitta toisaalla. Kestävä kehityksen käsite on kuitenkin suhteellinen, niin että hakkuutähteen energiakäytön ympäristövaikutuksia tulee viime kädessä verrata korvattavan vaihtoehdon ympäristövaikutuksiin maassa, vedessä ja ilmakehässä. On tähdittävä ympäristörasituksen minimoimiseen ja varmistauduttava siitä, että hyödyt ylittävät haitat.

Tässä koosteessa tarkastellaan kahta uudistusalojen hakkuutähteen talteenottoon liittyvää metsätaloudellista seurannaisvaikutusta: metsämaalle aiheutuvat ravinnemenetykset ja niiden vaikutus uuden puusukupolven kasvuun (5.1) sekä tähteen poiston vaikutus metsän uudistamisessa (5.2). Ongelmana on, että nämä tavantakaa esiin nousevat kysymykset vaativat pitkäaikaista seurantaa sekä koetoistoja eri olosuhteissa, eikä tyhjentyviä tutkimustuloksia ole vielä käytettävissä.

Ravinteitten kierto maan ja kasvillisuuden välillä on oleellinen osa metsäekosysteemin toimintaa. Osa puun ottamista ravinteista palautuu vuosittain karikkeen mukana maahan, mutta osa kerääntyy puuston biomassaan ja vapautuu siitä vasta, kun biomassa puun kuoleman jälkeen hajoaa. Kierto ei ole täysin suljettu, sillä huuhtoutuminen aiheuttaa ravinnemenetyksiä, ja rapautuminen ja ilmakehän kautta tulevat laskeumat taas lisäävät kasveille käyttökelpoisia ravinteita ekosysteemissä.

Kun ihminen poistaa metsästä puutavaraa, *ravinnekierto häiriintyy*. Mitä tehokkaammin biomassa otetaan puuta korjattaessa talteen, sitä vakavammiksi käyvät myös ravinnemenetykset. Näin tapahtuu erityisesti silloin, kun korjuun kohteena on latvusmassa ja sen ravinnerikas viheraine. Kuorelliseen runkopuuhun verrattuna esimerkiksi männyn neulasten typpipitoisuus on 12-kertainen, kaliumpitoisuus 10-kertainen, fosforipitoisuus 7-kertainen ja kalsiumpitoisuus 4-kertainen kuivamassayksikköä kohden (Mälkönen 1977).

Kun metsikkö varttuu ja puustoon varastoituu maan ravinteita ja positiivisia ioneja, metsämaa happamoituu. Vasta kun puusto kuolee ja biomassa hajoaa, positiiviset ionit palautuvat takaisin maahan, ja happamuus palautuu ennalleen. Mutta jos biomassa kerätään tarkoin talteen, hakkuun happamoitumista kompensoiva vaikutus menettää merkitystään. Ruotsissa hakkuutähteen poiston vaikutukseksi on todettu 0,1 pH-yksikköä (Nykvist & Rosén 1984).



Kuva 34. Päätehakuuvaiheen männikön ja kuusikon biomassaositteitten sisältämät ravinteet laskettuina rungon kuorellista kuutiometriä kohti (Mälkönen 1977).

Kuva 34 antaa esimerkin puuston maanpäälliseen osaan sitoutuneitten pääravinteitten määrästä kuorellisen runkopuun kuutiometriä kohti päätehakuuvaiheen männikössä ja kuusikossa. Täydellisenä toteutettuna latvusmassan talteenotto kasvattaisi hävikin ravinteesta riippuen männyllä 1,5–2,6 kertaiseksi ja kuusella jopa 2,0–4,4 kertaiseksi. Lisähävikistä yli puolet aiheutuisi neulasmassasta, vajaa puolet oksien puu- ja kuoriaineksesta. Todellisuudessa paljousuhteet vaihtelevat tapauskohtaisesti latvusmassan suhteellisesta määrästä riippuen.

Vaikkei latvusmassan täydellinen talteenotto ole missään olosuhteissa edes teknisesti mahdollista, *kysymys tehokkaan talteenoton vaikutuksesta metsämaan tuotoskykyyn nähdään monesti metsäenergian käytön avainongelmana*. Usein esitettyjä kysymyksiä ovat:

- Johtaako latvusmassan talteenotto kertaluonteisena tai toistuvana metsämaan tuotospotentiaalın alenemiseen?
- Vaikuttaako maan luontainen viljavuus ravinnehävikin sietokykyyn?
- Miten korjuutekniikka ja toimintamallit on mukautettava, jottei hyväksyttävii rajoja ylitetä kerätessä latvusmassaa fossiilipolttoaineita korvaavan energian tuottamiseen?

Latvusmassan talteenotto rasittaa puustolle käyttökelpoisen mineraalityypen ja peruskationien, erityisesti kaliumin varoja. Tämän voidaan olettaa vaikuttavan haitallisesti puuston kasvuun. Toisaalta voimakkaan typpilaskeuman alueilla kuten Etelä-Ruotsissa hakkuutähteen poiston arvellaan lieventävän maan typpikuormitusta. Sen sijaan talteenotto ei välttämättä rasita humuskerroksen hiilivarjoja, jotka joka tapauksessa aina vähenevät uudistushakkuun jälkeen (B.A. Olsson 1996).

Ravinteita vapautuu kasveille käyttökelpoiseen muotoon paitsi hakkuutähteistä myös maassa entuudestaan olevasta orgaanisesta aineksestä. Maan muokkaus nopeuttaa vapautumista. Kun uudistusalalla ei ole vielä puustoa tai muutakaan kasvillisuutta vapautuvia ravinteita sieppaamaan, niitä paitsi pidättyy maahan myös huuhtoutuu pinta- ja pohjavesiin. Pitkäaikaisessa seurannassa on todettu, että tähteen poisto vaikuttaa maan ravinnepitoisuuteen vähemmän kuin tähteen ravinnesisältö sinänsä edellyttäisi, mikä selittyy tähteistä vapautuvien ravinteitten osittaisella huuhtoutumisella (Eriksson 1996). *Hakkuutähteen talteenotto siis supistaa huuhtoutumista*, vaikuttaa edullisesti veden laatuun sekä hillitsee puun taimia haittaavan pintakasvillisuuden rehevöitymistä.

Maan *tuotospotentialissa tapahtuvien muutosten* selvittämiseen tarvitaan ehkä jopa kiertoajan kattavaa seurantaa, mutta niin vanhoja koesarjoja ei ole olemassa. Ruotsissa on julkaistu 15 vuoden seurantatuloksia kahdesta männikön ja kahdesta kuusikon uudistusalasta sovellettaessa kolmea eri korjuuvaihtoehtoa: perinteinen runkopuun korjuu tavaramenetelmällä; runkopuun korjuu ja lisäksi vihreän latvusmassan täydellinen poisto neulasineen; runkopuun korjuu ja latvusmassan poisto ruskeana sen jälkeen, kun oksat ovat varistaneet neulasensa. Seuranta kohdistui valtapuitten pituuskasvuun, taimien eloonjäämiseen sekä ns. hoitotulokseen, jolla tarkoitettiin kaikkien istutustaimien pituuksien neliöittien summaa (m²/ha). Tulos oli 15 vuotta istutuksen jälkeen seuraava (Egnell & Leijon 1996):

- *Pituuskasvu.* Männyn uudistusaloilla ei todettu merkittäviä eroja korjuumenetelmien välillä. Kuusen uudistusaloilla, valtapuitten ollessa viljavammalla kasvupaikalla 7 m ja köyhemmällä 3 m, vihreän hakkuutähteen täydellinen poisto oli aiheuttanut pisimmissä puissa noin puolen metrin jälkeenyjäämiseen. Jos tähde oli poistettu neulasitta ruskeana, eroja ei ollut havaittavissa.
- *Eloonyjääminen.* Kun tähde poistettiin, taimia jäi enemmän eloon. Kun tähde poistettiin vihreänä, taimista oli 15 vuoden kuluttua elossa kahdella männyn uudistusalalla 10 ja 5 prosenttiyksikköä enemmän sekä kahdella kuusen uudistusalalla 5 ja 3 prosenttiyksikköä enemmän. Ruskean tähteen talteenotolla ei ollut yhtä selvää myönteistä vaikutusta.
- *Hoitotulos* eli taimien pituuksien neliösumma. Männyn taimikossa korjuuvaihtoehtojen välillä ei ollut eroa, mutta kuusella vihreän tähteen poisto heikensi tulosta köyhemmällä kasvupaikalla. Ruskean tähteen poistolla ei ollut vaikutusta kummallakaan kasvupaikalla.

Ruotsissa on seurattu jo 30 vuoden ajan provokaatiokokeeksi nimitettyä koealasarjaa, jossa kaikki latvusmassa on poistettu vihreänä, ensin uudistushakkuun ja toistamiseen vielä 24 vuoden iällä ensiharvennuksen yhteydessä. Toistettunakaan tähteen talteenotto ei ole johtanut tuotostappioihin kolmessa männikössä, mutta kolmessa kuusikossa tuotostappiot ovat olleet 6–13 %, mikä merkitsee 2–4 vuoden jälkeenyjääneisyyttä taimikon kehityksessä. Kokeella ei ole pyritty jäljittelemään käytännön korjuuoloja, vaan tarkoituksena on ollut löytää tuotostappion ääriaraja täydellisessä ja toistuvassa kokopuunakorjuussa (Leijon & Egnell 1996).

Metsäntutkimuslaitoksella on Rautavaaralla kuusenviljelykoe, jossa vertaillaan kolmea vaihtoehtoa käsittelyä: kylvö aurasalalle, jolla tähteet ovat jäljellä; istutus aurasalalle, jolla tähteet ovat jäljellä; istutus aurasalalle, jolta kaikki tähteet on poistettu vihreinä. Viljely tapahtui kaikissa tapauksissa auranpalteisiin. Kummallakin istutus-

alalla taimikon valtapituus oli 13 vuoden kuluttua 4,5 m ja pituusjakauma täsmälleen sama. Kylvöalalla valtapituus oli 3 m. Hakkuutähteen talteenotto ei ole tässä tapauksessa ainakaan toistaiseksi vaikuttanut kuusikon tuotokseen (Kukkola 1993).

Seurantatutkimukset eivät ole vielä jatkuneet riittävän pitkään antaakseen tyhjentävän vastauksen latvusmassan vaikutuksesta uuden puusukupolven kasvuun. Tulokset niin uudistus- kuin ensiharvennushakkuistakin viittaavat kuitenkin yksiselitteisesti siihen, että *latvusmassan vaikutus tuotokseen on männyllä vähäisempi kuin kuusella*. Useimmissa kokeissa tuotostappioita ei ole havaittu männyllä itse asiassa laisinkaan, vaikka latvusmassan talteenoton aiheuttama ravinnehävikki on saattanut olla huomattava. Puulajien erilaisen kasvureaktion on tulkittu aiheutuvan siitä, että mänty pioneeripuulajina on sopeutunut rivakkaan kasvuunlähtöön puutteellisessakin ravinnetilanteessa, esimerkiksi ankaran metsäpalon jälkeen (Egnel & Leijon 1996).

Jos latvusmassan poiston ei olekaan havaittu vaikuttavan uuden mäntysukupolven kasvuun, kuusella tällaisia vaikutuksia on siis todettu. Mutta on huomattava, että *koeyärjestelyillä on etsitty äärivaikutusta poistamalla tähde täydellisesti*, kun taas käytännön oloissa 30 % latvusmassasta jää teknisistä syistä keräämättä. Niinikään on huomattava, että kokeitten kontrolliruuuilla tähde on siroteltu tasaisesti levälleen, vaikka se todellisuudessa jakaantuu hakkuukoneen jäljiltä epätasaisesti, puuttuen toisaalla tyystin ja kasaantuen toisaalla haitallisen paksuiksi kerrostumiksi. Kokeet näet on suunniteltu pikemminkin osoittamaan tähteitten vaikutus yleisellä tasolla kuin jäljittelemään mitään tiettyä korjuumenetelmää.

Kuusen uudistusaloilla vihreän latvusmassan poiston aiheuttama tuotostappio on todellisuudessa ehkä puolet kokeissa mitatuista ääriarvoista. Kuusikoittenkin tuotostappiot voitaneen eliminoida lähes kokonaan, jos *neulasten annetaan varista kasvupaikalle* ennen latvusmassan talteenottoa. Samalla kuitenkin biomassakertymä hupenee ja korjuukustannukset kasvavat, eikä neulasmassan keskittymistä hakkuukoneen keräämien tähdekasojen pohjalle voida tällöinkään estää.

Ekologisesti moitteeton ratkaisu on poltossa syntyvän *tuhkan kierrätys*, jolloin biomassan mukana poistuneet ravinteet tyyppiä lukuun ottamatta palautetaan luontoon. Samalla vältetään myös tuhka-kaatopaikoilla aiheutuvat kustannukset ja ympäristöongelmat. Edellytyksenä on, *ettei puuntuuhan raskasmetallipitoisuutta päästetä nousemaan* esimerkiksi sekapoltolla fossiilipolttoaineitten kanssa.

Metsäntutkimuslaitoksen vuosikymmeniä vanhat tuhkalannoituskokeet ovat parantaneet puuston kasvua typpirikkailla turvemaiilla pitkävaikutteisesti, ja puun tuhka on todettu tehokkaaksi terveyslannoitteeksi ravinnepuutoksista kärsivillä turvemaiilla (Silfverberg 1996). Levitystekniikkaa on ollut tarjolla jo 1970-luvulta lähtien (Hakkila & Kalaja 1983), mutta käytännössä tuhkalannoitus ei ole saavuttanut suosiota. *Kovettamis- ja rakeistamistekniikan* kehittymisen toivotaan edistävän tuhkan kierrätystä: pölyongelma lievenee, levityksen tasaisuus paranee ja tuhkan liukeneminen hidastuu, jolloin suurten tuhka-annosten kasvillisuudelle aiheuttama sokkivaikutus vaimenee.

Ruotsissa puun energiakäytön kasvuennusteissa on asetettu lähtökohdaksi, että tuhka kierrätetään. Skogforsk on laatinut tietokoneohjelman, joka laskee latvusmassan tal-

teenoton aiheuttaman pääravinteitten hävikin sekä tuhkalannoituksen tarpeen harvennus- ja uudistushakkuissa. Tavoitteena voi olla joko ravinnehävikin kompensoiminen tai happamoitumisvaikutuksen mitätöiminen (Jacobson & Mattsson 1998).

Tuhkan palauttamiselle on vahvat ekologiset ja, ainakin tietyissä oloissa, jo taloudellisetkin perusteet. Mutta miten, milloin ja mihin tuhka tulisi palauttaa, jotta siitä toisaalta saataisiin mahdollisimman suuri taloudellinen hyöty ja jotta lähtökohtana oleva ekologisen kestävyuden tavoite todella täyttyisi? Monta kysymystä on edelleen vastausta vailla:

- Onko puuntuhka välttämättä palautettava metsään, vai voidaanko se, edellyttäen ettei raskasmetallipitoisuus ylitä sallittuja rajoja, levittää metsämaan sijasta maatalousmaalle happamuutta torjumaan?
- Voidaanko kangasmaalta kerätystä hakkuutähteestä jäänyt tuhka levittää turve- maalle, esimerkiksi ravinnepuutosten vaivaamalle metsitettävälle suopellolle, missä tuhkan aikaansaamat puuston kuntoutumis- ja kasvureaktiot ovat voimak- kaimmat?
- Voidaanko uudistusosalta kerätystä hakkuutähteestä jäänyt tuhka levittää nuoreen harvennusemetsikköön, jonka kasvuisa puusto pystyy sitä ehkä paremmin hyödyntämään?
- Jos ekologisen kestävyuden katsotaan edellyttävän tuhkan palauttamista tarkal- leen alkuperäiselle kasvupaikalle, onko uudistusosalta peräisin oleva tuhka pa- lautettava välittömästi, vai voiko palautus tapahtua viipeellä vasta taimikon sul- keuduttua?

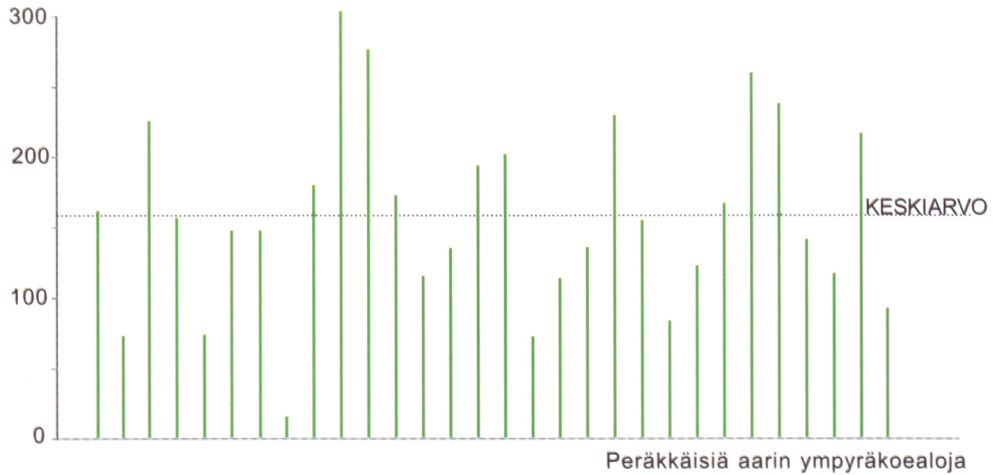
Keinovalikoima hakkuutähteen energiakäytön ekologisen perustan turvaamiseksi on laaja. Vaikutukset riippuvat kasvupaikasta ja puulajista, ja latvusmassan talteenotto ja tuhkan kierrätys on sovitettava niiden mukaan. Kysymys on monimutkaisista ja hi- dasvaikutteisista ekologisista prosesseista, joitten syy- ja seuraussuhteita ei tunneta riit- tävästi. Metsäenergian tuotantotekniikan tutkimuskokonaisuus ontuu, ellei myös kes- keisiin ekologiin tutkimustarpeisiin ohjata rahoitusta.

5.2 Tähteen poistamisen vaikutus metsän uudistamisessa

Ruotsissa maksetaan hakkuutähteestä kantorahaa olosuhteista riippuen noin 5 mk/i-m³, mutta Suomen halvemmilla energiahinnoilla se ei ole toistaiseksi mahdollista. Kannat- taako metsänomistajan luovuttaa tähde korvauksetta, kun mukana poistuu ravinneva- roja, ja koneitten aiheuttamat painumatkin saattavat tähdesuojan puuttuessa ja ajoker- tojen lisääntyessä syventyä?

Metsänomistajalle koituu toki hyötyäkin, etenkin kun keruu kohdistuu lähinnä sellai- sille uudistusaloille, joilla tähdettä on haitallisen runsaasti. Paksu tähdepeitto näet vai- keuttaa metsämaan muokkausta, sillä metsä-äkeelle tuottaa vaikeuksia tavoittaa ja rik- koa kasojen alle jäävä maa. *Tähteen talteenoton jälkeen paksuja kasaumia ei juuri- kaan enää ole*, vaan jäljelle jäänyt noin 30 %:n osuus tähteestä jakaantuu kohtuullisen tasaisesti uudistusosalalle (kuva 35).

Tähteen jäämä, kg/aari



Kuva 35. Palstahaketuksessa jäljelle jääneen hakkuutähteen jakaantuminen aarin ympyräkoaloilla erällä kuusen uudistushakkuualalla Kasiniemessä.

Tähteet vaikeuttavat istutustyötä ja johtavat ylisuuriin istutusväleihin. Ne hidastavat istuttajan kulkua ja estävät kelvollisen istutuspaikan löytymistä. Kun uudistusala Kanadassa äestettiin vuoden kuluttua hakkuusta, 19 % tavoitelluista istutuskohdista menetettiin tähteen vuoksi. Kun äestys tehtiin kahden vuoden kuluttua, menetettiin 12 % istutuskohdista (Cormier 1997). Jos maa muokataan äestyksen sijasta mätästämällä, tähteen vaikutus on pienempi (Koskenranta & Reiman 1997).

Metsäntutkimuslaitoksen kokeessa istutettiin kourukuokalla nelivuotiaita avojuurisia kuusentaimia metsurin hakkaamalle muokkaamattomalle uudistusosalalle. Tähteitten täydellinen poisto paransi istutustyön tuottavuutta vähäpuustoisella leimikko-osuudella 28 % ja runsaspuustoisella peräti 68 % (Hakkila 1973). Koska poistoruuduille ei jäänyt lainkaan tähdettä, koe liioittelee tähteen talteenoton tosiasiallista vaikutusta istutustyön tuottavuuteen, ja lisäksi se edustaa vanhentunutta korjuu- ja metsänuudistamistekniikkaa. Se antaa joka tapauksessa osviittaa siitä, että *tähteen poisto kohentaa istutus- ja kylvötyön tuottavuutta ja laatua nykytekniikankin puitteissa.*

Metsäntutkimuslaitos inventoi TTS Delta äkeen muokkausjäljen kahdeksalla kuusen uudistusosalalla yhteensä 27 vakokilometrin matkalta. Neljältä uudistusosalalta tähde oli kerätty energiakäyttöön, toisilla neljällä se oli jätetty paikalleen. Tähteen *poistolla oli myönteinen vaikutus muokkausjälkeen* (kuva 33):

| | Vakourasta muokkaantumatta, % | Muokkaantumattoman katkon keskipituus, m |
|-----------------------|-------------------------------|--|
| Hakkuutähde jäljellä | 18,4 | 3,6 |
| Hakkuutähde poistettu | 3,8 | 2,4 |

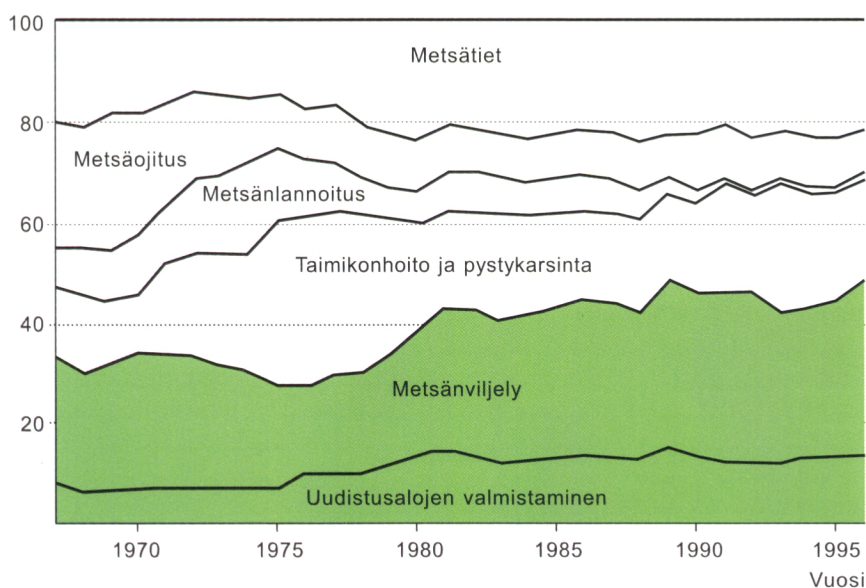
Jos hakkuutähteen energiakäyttö Ruotsin mallin mukaisesti saavuttaa todella laajat mittasuhteet, *vaikutukset metsänuudistamisen ratkaisuihin ja tekniikkaan ovat mittavat.* Tähteen poisto saattaa vaikuttaa esimerkiksi seuraavasti:

- *Muokkaus päästään toteuttamaan välittömästi hakkuun ja tähteen poiston jälkeen. Runsaspuustoisilla aloilla tämä voi merkitä jopa kahden vuoden ajansäästöä metsänviljelyssä riippuen siitä, korjataanko tähde vihreänä vai ruskeana.*
- *Muokkausjäljen paraneminen pienentää taimettumatta jäävien reikien määrää ja kokoa niin keinollisesti kuin luontaisestikin uudistettaessa.*
- *Luontaisen uudistamisen aloilla tähteen poisto supistaa taimien peittymistä ja tuhoutumista.*
- *Tähteen poisto vihreänä hillitsee pintakasvillisuuden rehevöitymistä ja myyrin lisääntymistä.*
- *Istutus- ja kylvötyön laatu paranee ja kustannukset alenevat.*
- *Istutus- ja kylvötyön koneellistaminen helpottuu.*
- *Mikroilmastossa tapahtuu muutoksia, ja tähteitten taimille tarjoama suoja aurinkoa, tuulta ja hallaa vastaan heikkenee (vrt. Raivonen & Leikola).*

Seurausten taloudellista merkitystä on vaikea arvioida, kun ne ovat osittain laadullisia. Mikkelin Puuha-projektissa kerättiin hakkuutähdettä kolmen vuoden aikana 530 ha:n alalta, ja metsänuudistamiskuluja arvioitiin säästyneen yhteensä 300 000 mk eli yli 500 mk/ha (Saksa ja Auvinen 1996).

Metsänviljelyn kustannukset ovat nousseet 1970-luvulta lähtien voimakkaasti. Yhdes- sä uudistusalan valmistamisen kanssa niihin kuluu miltei puolet metsänhoito- ja perusparannustöitten kokonaiskustannuksista (kuva 36). Hakkuutähteen energiakäytön kautta saatavilla kustannussäästöillä ja muilla vaikutuksilla voisi olla suuri merkitys metsä- taloudelle. Tämä tulisi ottaa huomioon myös uudistamisen suunnittelussa.

Osuus kustannuksista, %



Kuva 36. Eri työlajien osuus metsänhoito- ja perusparannustöitten kokonaiskustannuksista (Metsätilastollinen... 1997).

6 Hakkuutähteen mahdollisuudet

Biomassapotentiaali

Suomessa, missä metsien kasvu asukasta kohti on suurempi kuin missään muussa Euroopan maassa, puu on ylivoimaisesti tärkein uudistuvan energian lähde. Jo nykyisin 18 % maamme primaarienergian kokonaiskulutuksesta katetaan puuperäisillä polttoaineilla. Energiapolitiikkamme tavoitteena on lisätä uusiutuvien energialähteitten osuutta yhä edelleen.

Niin kansantalouden, metsäteollisuuden kuin puuntuottajainkin yhteinen etu on, että raaka-aineeksi kelvollinen talousmetsien puusato käytetään kokonaisuudessaan jalostukseen. Mutta teollisuuden ainespuuta korjattaessa syntyy sivutuotteena myös raaka-aineeksi kelvotonta tähdettä, joka koostuu pääasiassa latvusmassasta ja osaksi myös pieniläpimittaisesta tai viallisesta runkopuusta. Sen kokonaismäärä on hakkuitten nykytasolla lähes 30 milj. m³ vuodessa. Kun kotimaisen ainespuun teollinen käyttö kasvaa, hakkuutähteen määrä paisuu vastaavasti.

Hakkuutähde on mittava energiareservi, teoreettiselta energiapotentiaaliltaan 60 TWh vuodessa. Talteenoton kohteena tulee kysymykseen kuitenkin vain varttuneen metsän uudistushakkuissa syntyvä tähdä. Osa uudistushakkuuleimikoistakin rajautuu eri syistä keruun piiristä. Kertymä supistuu myös siksi, että työmaakohteiksi hyväksyttävilläkin uudistusaloilla 30 % tähteen kokonaismäärästä jää joka tapauksessa keräämättä.

Metsäntutkimuslaitos on arvioinut, että rajauksista huolimatta teknisesti korjuukelpoisen hakkuutähteen määrä on neulasineen 8,6 milj. m³ ja neulasitta 5,6 milj. m³ vuodessa. Vastaavat energia-arvot ovat 18 ja 12 TWh vuodessa. Koska tähdettä kertyy kuusikosta kaksinkertaisesti verrattuna yhtä puisevaan männikköön, kysymyksessä on *voittopuolisesti kuusen oksista koostuva biomassa*. Tästä syystä potentiaaliselvitykset on tapana rajoittaa kuusivoittoisiin leimikoihin. *Männiköitäkään ei kuitenkaan ole syytä jättää kokonaan suunnittelun ulkopuolelle pienemmästä kertymästä huolimatta, sillä:*

- Männyn hakkuutähdehakkeen tuotantokustannus on keskimäärin korkeampi kuin kuusen, koska kertymä hehtaarilta on noin 50 % pienempi. Tästä syystä runkopuun kertymänä mitatun leimikon vähimmäiskoon tulee olla männiköissä suurempi kuin kuusikoissa. Korkeampi kustannus rajoittuu lähinnä tähteen keruuvaiheeseen traktorilla tai palstahakkurilla. Siksi sijainniltaan ja korjuuteknisiltä olosuhteiltaan muutoin edullinen männyn uudistusala saattaa olla hakkuutähdehakkeen tuotannon kannalta edullisempi kohde kuin etäämpänä sijaitseva kuusen uudistusala.
- Männyn hakkuutähdehakkeen etuna on pienempi neulaspitoisuus, ja jos tähdä otetaan talteen neulasitta ruskeana, määrä hupenee männyllä vähemmän kuin kuusella. Kertymäero siis supistuu.
- Hakkuutähdehakkeen tuhkapitoisuus on männyllä merkittävästi pienempi kuin kuusella (taulukko 4).
- Hakkuutähteen talteenoton ei ole todettu vaikuttavan männyn kasvuun ainakaan ensiharvennusleimikoissa, kun taas kuusen ensiharvennusleimikoissa vaikutuksia on todettu. Uudistushakkuuleimikoissa vaikutuksia on tutkittu vähemmän,

mutta niissä ne ovat kummallakin puulajilla vähäisempiä kuin ensiharvennuk-
sissa, joten tähteen talteenoton rajoittamista pelkästään kuusikoihin ei voida pe-
rustella ravinnetaloudellisin syin. Poikkeuksena ovat tietenkin ekologisesti her-
kät kasvupaikat kuten esimerkiksi jäkälä- ja kanervakankaat ja rämeet, jotka jää-
vät keruun ulkopuolelle myös vähäisen kertymän vuoksi.

Lopputuloksen kannalta on suuri merkitys sillä, korjataanako hakkuutähdehake
vihreänä neulasineen vai ruskeana neulasitta. Vaikka ruskeaan hakkeeseen aina
jää jonkin verran neulasia, valinta vihreän ja ruskean hakkeen välillä vaikuttaa syväl-
lisesti niin hakkuualan metsittämiseen, hakkeen hankintaketjuun kuin hakkeen poltto-
aineominaisuuksiinkin:

- Neulasten varistaminen vaatii yli kesäkauden jatkuvaa varastointia hakkuualal-
la, mikä vesittää mahdollisuuden metsänviljelyn aloittamisesta välittömästi hak-
kuuta seuraavana keväänä.
- Uudistusalojen kaikesta hakkuutähteestä, hukkarunkopuu mukaan luettuna, koos-
tuu neulasista männiköissä noin 20 % ja kuusikoissa jopa 30 %. Neulasten osit-
tainenkin varistaminen siis supistaa kertymää.
- Kun kertymä supistuu kasaa, hehtaaria ja leimikkoa kohti, korjuutyön tuottavuus
alenee ja kustannukset kasvavat. Tämä vaikuttaa erityisesti metsäkuljetuksen,
palstahaketuksen ja konesiirtojen yksikkökustannuksiin sekä hankinnan yleisku-
luihin ja kasvattaa keruukelpoiseksi hyväksyttävän leimikon vähimmäiskokoa.
- Kun neulaset jäävät pois tai niitten osuus kuivamassasta ainakin supistuu, hak-
kuutähdehakkeen polttoaineominaisuudet paranevat. Neulaset näet aiheuttavat
etenkin suojalumeen sekoittuessaan hakkeen holvaantumista auton lavalla ja sii-
lossa, niissä on tulipesässä korroosiota aiheuttavaa klooria, niistä jää runsaasti
tuhkaa ja tuhkan sulamispiste on tavanomaista alhaisempi. Neulasten varisut-
tamiseen liittyy luonnollisesti myös kosteuden aleneminen.
- Hakkuutähteen talteenoton aiheuttama ravinnehävikki supistuu puoleen, jos kaik-
ki neulaset jäävät hakkuualalle. Kun tähteen kuivattaminen tapahtuu hakkuuko-
neen tekemillä kasoilla, neulaset eivät kuitenkaan varise tasaisesti hakkuualalle.

Kustannuskilpailukyky

Bioenergian tutkimusohjelmassa paino oli aluksi pitkään pikemminkin nuorten kasva-
tusestusmetsien pienpuussa kuin varttuneitten päätehakuuleimikoitten biomassatähteessä.
Painotuksen taustalla ovat olleet paljolta nuorten metsien metsänhoidolliset ongelmat,
joita pienikokoisen puun menekin kohentuminen helpottaisi. Pienpuusta tehtävän hak-
keen korkea hinta jarruttaa kuitenkin käyttöä suurissa voimaloissa, joissa hake käy
kustannuskilpailua turvetta ja hiiltä vastaan. Toisaalta taas uudistushakkuitten koneel-
listaminen on luonut hyvät teknis-taloudelliset edellytykset hakkuutähdehakkeen kus-
tannusten alentamiselle. Erityisesti suuret laitokset ovat alkaneet kiinnostua hakkuu-
tähdehakkeen mahdollisuuksista.

Pienpuuhakkeen kallein kustannuserä on yksinpuin tapahtuva kaato ja kasaus. Hak-
kuutähteeltä puuttuu vastaava kustannus lähes kokonaan, sillä hakkuukoneitten työ-
skentelytekniikka voidaan mukauttaa tähdettä kasaamaan ja talteenottoa edistämään.
Työskentelytavan muutos alentaa hakkuukoneen tuottavuutta ehkä 2–4 %, mutta hak-
kuutähdehakkeelle siirrettynä kustannuserä on vain 1–2 mk/MWh.

Suomessa hakkuutähde haketetaan joko hakkuualalla tai tienvarressa. Markkinain suppeuden vuoksi metsäkoneteollisuus ei ole viime vuosina entiseen tapaan panostanut siirrettävien hakkureitten kehittämiseen. Poikkeuksena on Logset Oy:n uusi Chipset palstahakkuri. Muutoin kehitystyö on jäänyt lähinnä yksityisten koneyrityksien harteille.

Ruotsissa haketustapahtumaa on kustannussyistä ja laadunhallinnan terävöittämiseksi siirretty enenevässä määrin hakkuualalta tien varteen sekä edelleen käsittelyterminaaliin tai käyttöpaikalle. Silloin autokuljetus tapahtuu hakettamattomana tähteenä, ja kuljetuksen kustannukset nousevat korkeammiksi kuin hakkeella, mutta saavutettavat logistiset edut ja hakevirran parempi hallinta saattavat painaa enemmän. *Haketuksen keskittäminen saattaa Suomessakin tulla harkittavaksi*, kun tuotantomäärät kasvavat nykyisestään oleellisesti. Hakettamattoman tähteen autokuljetus edellyttäisi kuorman koon kasvattamista, mihin taas tarvitaan tehokasta puristus- tai paalaustekniikkaa.

Viime vuosina *hakkuutähdehakkeen tuotantokustannukset ovat alentuneet* ja kilpailukyky muita polttoaineita vastaan parantunut. Tähän ovat myötävaikuttaneet kone- ja kuljetusyrittäjien kilpailuttaminen, talteenoton integroiminen hakkuukoneen työskentelyyn, hankintalogistiikan järjeistäminen, käyttömäärien kasvu ja koneitten tekninen kehitys. Hakkuutähdehakkeen kustannus on käyttöpaikalle toimitettuna ilman arvonsäveroä 40–50 mk/MWh. Metsänomistajalle ei meillä makseta tähteestä kantorahaa, mutta Ruotsin korkeammalla hintatasolla siihen on mahdollisuuksia.

Hakkuutähdehakkeen *kustannus on Suomessa selvästi alhaisempi kuin Ruotsissa*. Se on itse asiassa puristettu niin alas, ettei koneyrityksille jää juurikaan mahdollisuuksia kaluston uusimiseen. Käytön laajeneminen suuriin laitoksiin edellyttäisi kustannustason alentumista edelleen, mutta kone- ja kuljetusyrittäjät toimivat jo nyt kannattavuuden ääri rajoilla. Jos kuitenkin esimerkiksi energiaverotkaisuut helpottaisivat hakkeen kilpailuasemaa, käyttömäärien kasvu voisi tuoda täystyöllisyyden tehokkaimmillekin koneille ja hankintaketjuille ja avata sitä kautta mahdollisuuksia kustannussäästöihin. Todellisina suurkäyttökohteina tulevat kysymykseen ennen kaikkea *metsäteollisuuden voimat sekä energiayhtiöitten ja kaupunkien turve- ja hiilivoimat*. Ne edellyttävät kilpailukykyistä hintaa, toimitusvarmuutta ja vaatimukset täyttävää laatua.

Kantovoimat

Hakkuutähdehakkeen tuotanto on *pääomavaltaista toimintaa*. Kaikki työvaiheet tehdään järeäköillä koneilla, eikä käsityölle jää sijaa. Kolmannes hakkeen hinnasta muodostuu kuljettajien palkkakustannuksista sivukuluineen. Kaksi kolmannesta koostuu pääomakuluista, koneitten korjauksesta, huollosta sekä poltto- ja voiteluaineista.

Siksi hakkuutähdehakkeen tuotannon *välitön työllistävä vaikutus ei ole erityisen suuri*, vain 150–200 miestävuotta miljoonaa kiintokuutiometriä kohti. Kun metsätalous työllistää Suomessa keskimäärin 2,7 henkilöä miljoonan markan tuotantoa kohti (Toropainen 1998), niin hakkuutähteen tuotannossa vastaava *työllisyyskerroin* jäänee keskiarvon alapuolelle, sillä kaikki työvaiheet on koneellistettu. Hakkuutähdehakkeen tuotanto synnyttää kyllä työpaikkoja, mutta sen ensisijainen kantovoima ei ole kuitenkaan työpaikkojen luominen.

Hakkuutähteen energiakäytön *väkevin kantovoima on ympäristön suojele*, mikä liittyy myös metsäteollisuusyritysten ja kuntain imagokuvaan. Kun hakkuutähdehakkeella korvataan fossiilipolttoaineita ja turvetta, alennetaan energiatalouden hiilidioksi-

di-, rikki- ja muita päästöjä ilmakehään. Miljoonan kiintokuutiometrin korvaava energiakäyttö *alentaisi Suomen hiilidioksidipäästöjä* 1 %:lla, ja jos korjuukelpoinen hakkuutähdepotentiaali otettaisiin käyttöön kokonaisuudessaan, vaikutus olisi vaihtoehdosta riippuen jopa 8 %.

Toisaalta kuitenkin tunnetaan *huolta tehostetun talteenoton vaikutuksesta metsämaan ravinnevaroihin*, sillä oksat ja eritoten neulasen neulasen sisältävät runsaasti ravinteita. Pysyvillä koelasarjoilla tehtyjen *tuotostutkimusten tulokset ovat rauhoittavia*. Männiköissä uuden puusukupolven kasvun ei ole ainakaan toistaiseksi todettu hidastuneen edes tähteen täydellisen poiston seurauksena. Kuusikoissa vaikutuksia sen sijaan on voitu osoittaa. Siksi herkimmat kohteet tulee rauhoittaa tähteen keruulta, ja ravinnehävikkiä kannattaa supistaa antamalla tähteen kuivua ja varistaa neulasensa hakkuualalle ennen korjuuta. Myös tuhkan kierrätys kannattaa ottaa käyttöön. Hakkuutähteen fossiilipolttoaineita korvaavaa käyttöä on tarkasteltava *ympäristövaikutusten optimointitehtävänä*. Ainakin vähäinen ravinnehävikki on hyväksyttävissä, jos vastapainoksi saavutetaan painavia etuja esimerkiksi ilmakehän päästöjen vähenemisen ja kasvihuoneilmiön hidastumisen kautta.

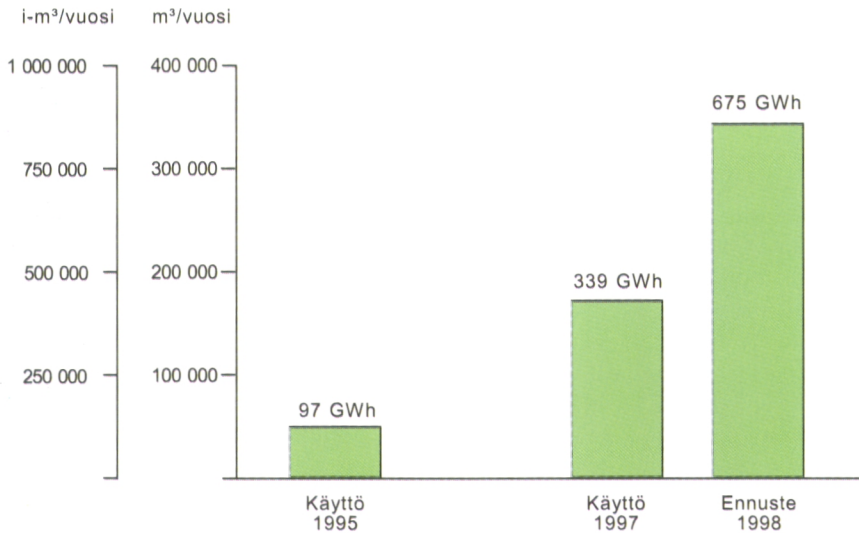
Kun Suomessa ei makseta metsänomistajalle korvausta hakkuutähteen luovuttamisesta, on perusteltua kysyä, miksi metsänomistaja ottaisi pientäkään riskiä maan ravinnevarojen menettämisestä? Metsänomistajalle koituu kuitenkin etuja metsän uudistamisessa, kun tähde pääosin poistetaan. Uudistamistyö voidaan sen ansiosta käynnistää ehkä vuoden etujassa, kustannuksia säästyy ainakin 500 mk/ha ja maanmuokkauksen, istutuksen ja kylvön työn jälki paranee ja tasoittuu. Tähteen poisto vähentää taimettumattomien reikien alaa myös luontaisessa uudistamisessa. *Metsänomistaja hyötyy vaikei ehkä saakaan hyötyä välittömästi kantorahan muodossa.*

Käyttönäkymät

Suuren biomassareservin, edullisen korjuulogiikan ja alentuneitten kustannusten perusteella on todennäköistä, että *metsähakkeen käytön lisäys tulee lähivuosina kohdistumaan paljolta hakkuutähdehakkeeseen*, kuten on jo tapahtunut Ruotsissa. Hakkuutähdehakkeen polttoainekäyttöä kohtaan on ollut epäroivia ennakoasenteita, mutta käyttökokeitten jälkeen asenteet ovat yleensä muuttuneet myönteisiksi.

Toistaiseksi hakkuutähdehakkeen käyttö on Suomessa vielä vaatimattomalla tasolla. Kuluvan vuosikymmenen puolivälistä lähtien se on kuitenkin vuosittain kaksinkertais- tunut (Kuva 37). Suurimpien hakkuutähdehakkeen tuottajien ja käyttäjien haastattelun perusteella *kasvu jatkuu voimakkaana myös vuonna 1998*, jolloin käytön ennustetaan nousevan 342 000 m³:iin (855 000 i-m³). Kun kaikki suuret metsäteollisuusyritykset ovat ympäristö-, imago- ja puukaupallisistakin syistä ryhtyneet selvittelemään mahdollisuuksia hakkuutähteen käytöstä suurissa energiantuotantolaitoksissa, kasvun voidaan olettaa jatkuvan ripeänä myös tulevina vuosina. Ollaanhan Suomessa vasta tasolla, joka on vain kymmenesosa hakkuutähdehakkeen käytöstä Ruotsissa.

Ruotsin esimerkki osoittaa, että energian hintasuhteitten sen salliessa vielä monin verroin mittavampi käyttö olisi meilläkin mahdollista. Ruotsissa tuotettiin metsähaketta vuonna 1996 peräti 4 milj. m³ (10 milj. i-m³), ja pääosa siitä tehtiin nimenomaan hakkuutähdeestä. Käytön odotetaan edelleen kasvavan vuoteen 2010 saakka keskimäärin 0,7 milj. m³ vuodessa (Brunberg 1997).



Kuva 37. Hakkuutähdehakkeen käytön kehittyminen Suomessa vuosina 1995–1998.

Jotta metsähakkeen käyttö Suomessakin jatkaisi kasvuaan, energiapolitiikalta odotetaan paitsi uusiutuvien lähteitten suosimista ennen kaikkea pitkäjänteisyyttä ja ennustettavuutta. Jos kasvu jatkuu, se tulee heijastumaan metsätaloudessa monitahoisesti, mitä metsätalouden suunnittelussa ei ole vielä täysin oivallettu. *Todennäköisiä seuraamuksia* ovat:

- Energian tuotanto integroituu metsätalouden kaikkeen suunnitteluun ja toimintaan
- Tähteen talteenotto vaikuttaa nykyisten kone- ja kuljetusyrittäjien työkenttään ja työllisyyteen, ja alalle tulee uusia hakeyrittäjiä
- Tähteen kysyntä kasvaa ja leviää uusille maantieteellisille alueille, ja toiminta muuttuu luonteeltaan ympärivuotiseksi
- Metsähakkeen hankintaorganisaatiot laajenevat ja ottavat käyttöön tehokkaampia koneita
- Talteenotto laajenee uusiin, ehkä vaikeammin korjattaviin leimikkotyyppisiin
- Kuljetusetäisyydet ja kuljetuksen tehokkuusvaatimukset kasvavat
- Metsähakkeen korjuulogiikka hioutuu edelleen, ja haketusta keskitetään terminaaleihin ja käyttöpaikoille.
- Tähteen talteenotto vaikuttaa merkittävästi metsänuudistamisen ratkaisuihin, tekniikkaan ja kustannuksiin
- Laaditaan tähteen talteenottoa ohjaavat ekologiset toimintamallit.
- Tähteen energiakäyttö sisällytetään puun tuotannon ja korjuun laatujärjestelmiin ja sertifiointimenettelyyn

On ilmennyt huolta siitä, että hakkuutähdehakkeen käyttö saattaa muodostua jarruksi pienpuuhakkeen käytölle, joka taas tarjoaa suurempia metsänhoito- ja työllisyshyötyjä. Mutta kun luodaan hankintaorganisaatio ja laajamittaista käyttöä hakkuutähdehakkeelle, tulee mahdolliseksi hyödyntää tehokasta kalustoa ja organisaatiota myös pienpuuhakkeen tuotannossa. Siksi on todennäköistä, ettei hakkuutähdehakkeen tuotannon vilkastuminen suinkaan muodostu esteeksi vaan siitä päinvastoin tulee *ponnahduslauta muistakin lähteistä saatavan metsähakkeen käyttöönnotolle*.

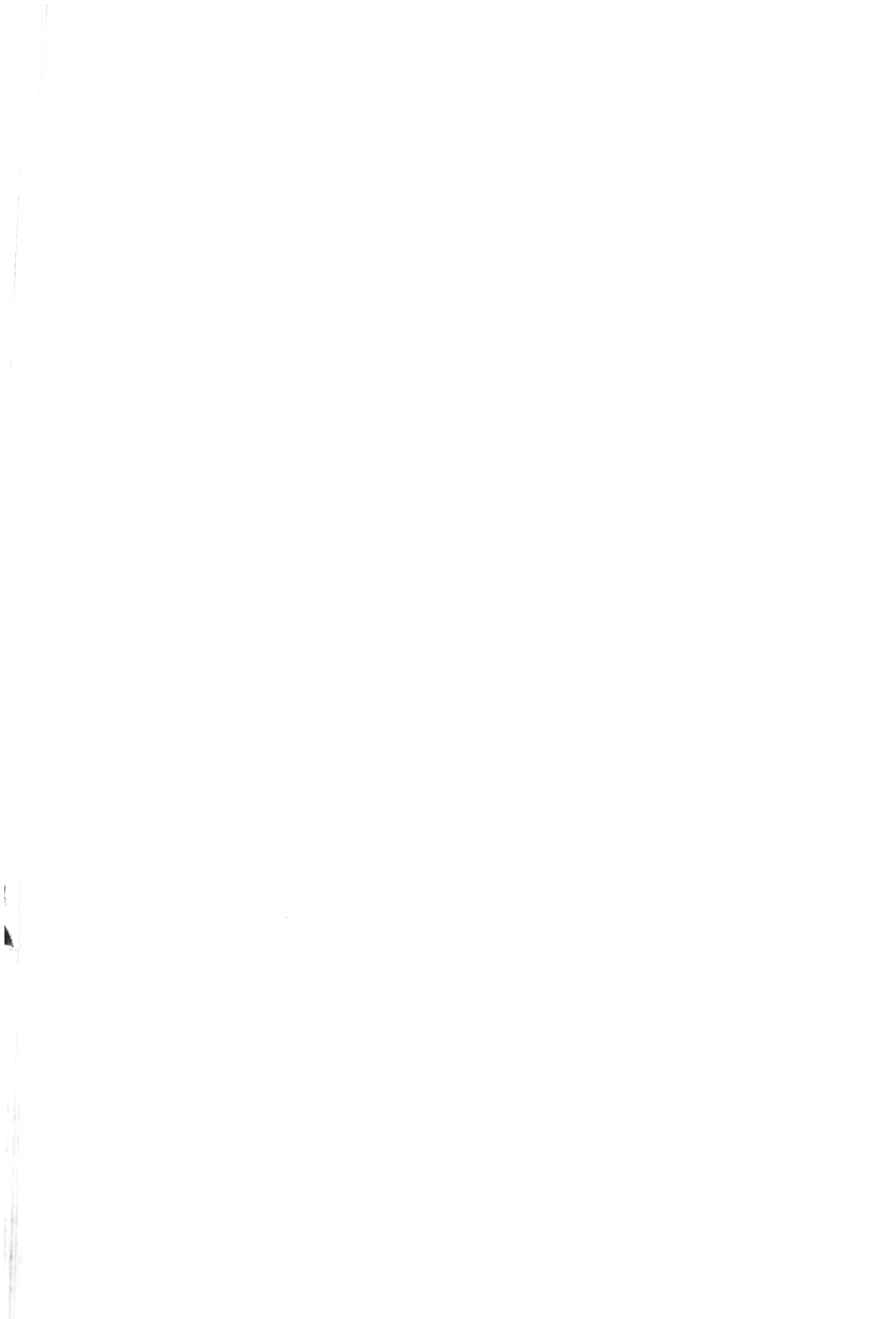
Lähdekirjallisuus

- Andersson, G. & Hudson, B. 1996. Baling of forest residues — a system analysis. Teoksessa: Hakkila, P., Heino, M. & Puranen, E. (toim.). Forest management for bioenergy. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 640: 102–110.
- Asikainen, A. 1995. Discrete-event simulation of mechanized wood-harvesting systems. Tiedonantoja 38. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. 86 s.
- Asikainen, A. & Ikäheimo, J. 1998. Puupolttoaineen tuotantomenetelmien tuottavuus ja kustannukset. Julkaisussa: Nikku, P. (toim.). Bioenergian tutkimusohjelman vuosikirja 1997. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 17: 225—231.
- Brunberg, B. 1991. Tillvaratagande av skogsbränsle – träddelar och trädrester. Skogsarbeten, Redogörelse 5. 54 s.
- Brunberg, B. & Hillring, B. 1996. Skogsbränsleuttag idag och i morgon. Julkaisussa Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring. Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift, Årg. 135 / Nr 13: 11–24.
- Brunberg, B. 1998. New techniques and methods in an expanding wood-fuel market. Teoksessa: Hakkila, P., Heino, M. & Puranen, E. (toim.). Wood fuels from conventional forestry. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 680. 122 s.
- Cormier, D. 1997. The effects of slash from delimiting at the stump on the quality of powered-disc scarification. FERIC. Field Note Silviculture -96. 2 s.
- Egnell, G. & Leijon, B. Kortsiktiga effekter på skogsproduktionen av helträdsuttag i gallring och slutavverkning. Julkaisussa Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring. Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift, Årg. 135 / Nr 13: 73–82.
- Elonen, J. & Korpilahti, A. 1996. Hakkuutähteen talteenoton vaikutus hakkuun ajamenekkiin ja tuottavuuteen. Metsätehon Katsaus 5/1996. 6 s.
- Energiakatsaus 1/98. 1998. Kauppa- ja teollisuusministeriö, energiaosasto. 36 s.
- Eriksson, H. 1996. Askåterföring –näringsekologiska effekter. Julkaisussa Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring. Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift, Årg. 135 / Nr 13: 53–60.
- FAO. 1997. Provisional outlook for global forest products consumption, production and trade to 2010. Rome.
- Hakkila, P. 1969. Weight and composition of the branches in large Scots pine and Norway spruce trees. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 67(6). 37 s.
- Hakkila, P. 1971. Coniferous branches as a raw material source. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 75.1. 60 s.
- Hakkila, P. 1973. The effect of slash on work difficulty in manual planting. Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja 78.1. 36 s.
- Hakkila, P. 1984. Forest chips as fuel for heating plants in Finland. Folia Forestalia 586. 62 p.
- Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. Folia Forestalia 773. 24 s.
- Hakkila, P. ja Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.
- Hakkila, P. & Kalaja, H. 1983. Puu- ja kuorituhkan palauttamisen tekniikka. Folia Forestalia 552. 37 s.
- Heikka, T. & Piirainen, K. 1981. Pienhakkureiden voimankäyttö. Folia Forestalia 496. 22 s.

- Hektor, B., Lönner, G. & Parikka, M. 1995. Trädbränslepotential i Sverige på 2000-talet. Ett uppdrag för Energikommissionen. Sveriges Lantbruksuniversitet. SIMS Serien Utredningar 17. 44 s.
- Helynen, S. & Nousiainen, I. 1996. Biopolttoaineiden tuotanto- ja käyttöpotentiaalit. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 99/1995.
- Hiilidioksiditoimikunta II:n mietintö. 1994. Komiteamietintö 2. 145 s.
- Hillring, B. 1996. Price trends for wood fuels in Sweden. European Bioenergy Conference. Copenhagen. 5 s.
- Hudson, B. 1998. UK Industry — baling and storage of wood fuel. Teoksessa: Hakki-la, P., Heino, M. & Puranen, E. (toim.). Wood fuels from conventional forestry. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 680. 122 s.
- Hämäläinen, M. 1995. Joustava hakkeen valmistus ja logistiikka. Julkaisussa: Alakan-gas, E. (toim.). Bioenergian tutkimusohjelman vuosikirja 1994. Osa I. Puupolttoaineiden tuotanto. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 6: 107–111.
- Hämäläinen, M. & Pankakari, P. 1996. Joustava hakkeen valmistus ja logistiikka. Julkaisussa: Alakan-gas, E. (toim.). Bioenergian tutkimusohjelman vuosikirja 1995. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 11: 135–137.
- Jacobson, S. & Mattsson, S. 1998. “Snurran” – et Exel-program som beräknar näringsuttag vid skörd av trädrester. Skogforsk. Resultat nr 1/1998. 4 s.
- Jirjis, R. 1996. Handling and storage of uncomminuted forest residues. Julkaisussa: Hudson, J.B. & Kofman, P.D. (toim.). Harvesting, storage and road transportation of logging residues. Proceedings of a workshop of IEA-BA-Task XII Activity 1.2, held in October 1995 in Glasgow, Scotland — Danish Forest and Landscape Research Institute, Hørsholm, Denmark.
- Kaipainen, H. 1997. Tiivistämisparametrit ja -tekniikat puupolttoaineiden metsä- ja kaukokuljetuksessa. Julkaisussa: Nikku, P. (toim.). Bioenergian tutkimusohjelman vuosikirja 1996. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 14: 233–238.
- Kalaja, H. 1978. Pienpuun korjuu TT 1000F palstahakkurilla. Folia Forestalia 374. 27 s. 43 s.
- Koskenranta, R. & Reiman, H. 1997. Energiapuun korjuun vaikutuksia metsäekosysteemiin ja metsänuudistamiseen. Keski-Suomen metsäkeskus. Julkaisu 1. 24 s.
- Kukkola, M. 1993. Tilajärjestyksen vaikutus puuston alkukehitykseen. Koeselostus. 4 s.
- Kärhä, K. 1994. Hakkuutähteen talteenotto osana puunkorjuun kokonaisurakointia. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta.
- Laurila, P. 1997. Chipset-järjestelmän demonstrointi. Julkaisussa: Bioenergian tutkimusohjelman vuosikirja 1997. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 14: 251–258.
- Leijon, B. & Egnell, G. 1996. Lånsiktiga effekter på skogsproduktionen av stora uttag av avverkningsrester. Julkaisussa: Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring. Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift, Årg. 135 / Nr 13: 83–89.
- Metsätilastollinen vuosikirja 1997. 1996. Metsäntutkimuslaitos. 348 s.
- Mielikäinen, K., Hirvelä, H., Härkönen, K. & Malinen, J. 1995. Energiapuu osana metsänkasvatusta Keski-Pohjanmaalla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 556. 56 s.
- Mälkönen, E. 1977. Betydelsen av helträdsutnyttjandet i skogens näringshushållning.

1977. Skogsbruket Nr 6: 124—125, 136.
- Nousiainen, I., Paappanen, T. & Vesisenaho, T. 1997. Biopolttoaineiden tuotantokustannukset ja hankintahinnat Suomessa sekä valtion toimien vaikutus niihin vuosina 1985—1995. VTT Energia. Tutkimuslaskelma ENE 31/T 0056/97. 32 s.
- Nousiainen, I. & Vesisenaho, T. 1996. Puupolttoaineen tuottaminen kokopuujuontomenetelmällä. Julkaisussa: Alakangas, E. (toim.). Bioenergian tutkimusohjelman vuosikirja 1996. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisu 11: 213—226.
- Nurmi, J. 1990. Polttohakkeen varastointi suurissa aumoissa. Summary: Longterm storage of fuel chips in large piles. *Folia Forestalia* 767. 18 pp.
- Nurmi, J. 1994. Työtavan vaikutus hakkuukoneen tuotokseen ja hakkuutähteen kasautumiseen. *Folia Forestalia* 1994(2). 10 s.
- Nurmi, J. 1996a. The effects of storage on logging residue fuel quality. Julkaisussa: Hudson, J.B. & Kofman, P.D. (toim.). Harvesting, storage and reed transportation of logging residues. Proceedings of a workshop of IEA-BA-Task XII Activity 1.2, held in October 1995 in Glasgow, Scotland — Danish Forest and Landscape Research Institute, Hørsholm, Denmark.
- Nurmi, J. 1996b. Hakkuutähteen metsäkuljetuksen tuottavuus pätehakkuukoissa. Käsikirjoitus *Folia Forestalia* -sarjaan, jätetty vuoden 1996 alussa.
- Nurmi, J. 1997a. Heating values of mature trees. *Acta Forestalia Fennica* 256. 28 s.
- Nurmi, J. 1997b. Hakkuutähteen polttopuu- ja ravinneominaisuudet. Julkaisussa: Nurmi, J., Hytönen, J. & Polet, K. (toim.). Polttopuusta puutuhkaksi. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 660.
- Nykvist, N. & Rosén, K. 1984. Effect of clear-felling and slash removal on the acidity of northern coniferous soils. *Forest Ecology and Management* 11: 157—169.
- Oijala, T., Säteri, L. & Örn, J. 1997. Puun korjuun ja puutavaran kaukokuljetuksen kustannukset vuonna 1996. *Metsäteho, Katsaus* 3/1997. 4 s.
- Olsson, M. 1996. Långsiktiga näringsbalanser vid uttag av skogsbränsle. Julkaisussa *Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring*. Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift, Årg. 135 / Nr 13: 37—44.
- Olsson, B.A. 1996. Näringsekologiska effekter av helträdsutnyttjande. Julkaisussa *Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring*. Kungl. Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift, Årg. 135 / Nr 13: 45—51.
- Pasanen, K., Vesterlin, V., Keskimölo, A., Soimasuo, J & Tokola, T. 1997. Alueellisten energiapuuvarojen analysointimenetelmä. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/1997: 25—35.
- Raivonen, M. & Leikola, M. 1980. Hakkuutähteen poistamisen vaikutus istutettujen kuusen taimien alkukehitykseen. *Folia Forestalia* 429. 13 s.
- Ryynänen, S. 1997. Hakkuutähteen korjuu kannattavaksi traktorin kuormatilaa suurentamalla. *Teho* 4: 13—14.
- Ryynänen, S. & Mononen, S. 1998. Kustannusten alentaminen hakkuutähteen kuljetuksessa maataloustraktorilla. Julkaisussa: Nikku, P. (toim.). Bioenergian tutkimusohjelman vuosikirja 1997. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisu 17: 219—223.
- Saksa, T. & Auvinen, P. 1996. Puuhakkeen hankinta- ja tutkimusprojekti Mikkelin seudulla. Julkaisussa: Alakangas, E. (toim.). Bioenergian tutkimusohjelma. Vuosikirja 1995, osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka: 265—274.
- Schildt, J. 1982. Unimog kuorma-autoon perustuva polttohakkeen hankintajärjestelmä. *Folia Forestalia* 519. 23 s.

- Silfverberg, K. 1996. Nutrient status and development of tree stands and vegetation on ash-fertilized drained peatlands in Finland. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 588. 27 s.
- Thörnqvist, T. 1987. Bränder i stackar med sönderdelat trädbränsle. Summary: Spontaneous combustion in piles with comminuted wood fuel. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för Virkeslära. Uppsatser 163.
- Thörnqvist, T., & Jirjis, R. 1990. Bränsleflisens förändring över tiden – vid lagring i stora stackar. Summary: Changes in fuel chips during storage in large piles. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för Virkeslära, Rapport 219. 49 pp.
- Toropainen, M. 1998. Metsäsektori kansantaloudessa. Julkaisussa: Hänninen, H. (toim.). Puuvarojen käyttömahdollisuudet. Käsikirjoitus.
- Trädbränsle 1997. 1997. NUTEK R 1997:49. 68 s.
- Vesisenaho, T. & Liukkonen, S. 1997. Kokopuujuontomenetelmän soveltaminen aines- ja energiapuun hankintaan. Julkaisussa: Nikku, P. (toim.). Bioenergian tutkimusohjelman vuosikirja 1996. Osa I. Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 14: 259–269.
- Wigren, C. 1991. Tillvaratagande av trädrester efter slutavverkning med engrepsskördare – studie av en bränsleanpassad metod hos Mälarskog. Skogarbeten. Moniste 1991-11-08. 16 s.
- Wigren, C. 1992. Studie av bränsleanpassad avverkning med engrepsskördare hos Mellanskog. Skogarbeten. Moniste 1992-02-14. 6 s.







Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684
ISBN 951-40-1624-6

ISSN 0358-4283

Kansikuva: Juha Nurmi