

Pro gradu -tutkielma

Hakkuutähteiden korjuun ympäristövaikutukset sekä
hakkuutähteiden korjuun vaikutus metsänuudistamisen
kokonaiskustannuksiin

Eero-Tapani Kärkkäinen



JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO

Bio- ja ympäristötieteiden laitos

Ympäristötiede ja -teknologia

9. joulukuuta 2010

JYVÄSKYLÄN YLIOPISTO, Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
Bio- ja ympäristötieteiden laitos
Ympäristötiede ja -teknologia

Eero-Tapani Kärkkäinen: Hakkuutähteiden korjuun ympäristövaikutukset
sekä hakkuutähteiden korjuun vaikutus
metsänuudistamisen kokonaiskustannuksiin

Pro gradu -tutkielma: 73 s.

Työn ohjaajat: Yliassistentti Margareta Wihersaari

Tarkastajat: Yliassistentti Margareta Wihersaari, FT Laura Vertainen

Joulukuu 2010

Hakusanat: Hakkuutähde, ympäristövaikutus

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö käynnistettiin Vapo oy Energian tilauksesta, kun yhtiö oli aloittamassa laajamittaista hakkuutähteiden keräämistä. Opinnäytetyössä on perehdytty hakkuutähteiden keräämisen vaikutuksiin maaperässä, vesistöissä sekä muussa metsäluonnossa.

Hakkuutähteiden korjuun taloudellisia vaikutuksia oli tarkoitus selvittää mahdollisimman havainnollisesti, ja muuntaa tulokset rahallisesti arvioitaviksi.

Metsänuudistamisessa hakkuutähteiden keräämisellä on pääasiassa positiivisia vaikutuksia: maanmuokkaus onnistuu paremmin, istutusolosuhteet ovat helpommat ja luonnontaimien täydentävä vaikutus on suurempi kuin runsaasti hakkuutähteitä sisältävällä kohteella. Hakkuutähdekasojen alle aikaisemmin jäänyt pinta-ala saadaan hyötykäyttöön, ja siksi taimikon tiheys on tasaisempi. Taimien tuhoriski on hieman pienempi hakkuutähteiden keräämisen jälkeen, osittain juuri tehokkaamman maanmuokkauksen vuoksi.

Ravinteita poistuu huomattavia määriä hakkuutähteiden keräämisen yhteydessä. Hakkuutähteiden keruu ei kuitenkaan vaaranna metsämaan puuntuotoskykyä ainakaan kertaluontoisena toimenpiteenä. Mikäli biomassaa kerätään toistuvasti samoilta kohteilta vuosikymmenten kuluessa, on vaarana maaperän ravinnevarojen väheneminen ja maaperän happamoituminen. Mikäli ravinnemenetyksiä korvataan, se kannattaa toteuttaa vasta syntyneen puuston harvennushakkuiden yhteydessä.

Hakkuutähteellä tuotetulla energialla voidaan alentaa lämpölaitoksen päästöjä merkittävästi. Esimerkiksi korvaamalla kivihiiltä hakkuutähteellä saadaan hakkuutähteiden talteenotolla päätehakkuun yhteydessä vähennettyä energiatuotannon hiilidioksidipäästöjä n. 40 t hehtaaria kohti. Päästökaupassa hehtaaria kohti hakkuutähteen arvo on useita satoja euroja hiilidioksidipäästön hinnasta riippuen.

UNIVERSITY OF JYVÄSKYLÄ, Faculty of Science
Department of Biological and Environmental Science
Environmental Science and Technology

Eero-Tapani Kärkkäinen: The Environmental Impact of Forest Residue Procurement
And The Influence Of Procurement On The Total Cost Of
Forest Renewal

Master's thesis: 73 p.

Supervisors: Associate Professor Margareta Wihersaari

Inspectors: Associate Professor Margareta Wihersaari, PhD Laura Vertainen

December 2010

Key words: Forest residue, environmental impact

Abstract

This study was carried out along with the commissioning by Vapo Oy Heat&Power, when this company was commencing wide ranging harvesting of forest residues. This study strived to gain an in depth knowledge of the impact to the soil, waterways and, amongst others, forest nature that harvesting of forest residues may cause.

The economical effects, of the harvesting of forest residues, were aimed to be clarified in as clear way as possible, and to adapt the results into financial values.

The impact, of the harvesting of forest residues, on forest renewal is mainly positive: the cultivation of soil is secured in a more desirable manner, the condition for planting is eased and the completing effect of natural saplings is greater than with locations that freely harvest forest residues. Surface areas of earlier locations that have been under forest residues are put into good use, the result of which is that sapling density is evenly distributed. The risk of sapling destruction is slightly lower after the harvesting of forest residues and this is partly due to effective soil cultivation.

Nutriments are removed in substantial amounts in connection with the harvesting of forest residues. Nevertheless, such harvesting does not endanger the production potential of timber, at least not through one-off procedures. In such a case where biomass is repeatedly removed from the same location during a decade then there does exist the potential for the soil to become low on essential nutriment and to become acidic. If it is desired to replace nutriment to the soil then this must be achieved at the creation of the new growing stock, in connection with the harvesting process.

Energy derived from harvested forest residues can significantly decrease emissions from heat production plants. An example is the comparison with coal burning where carbon dioxide emissions, from forest residue burning, can achieve a reduction of around 40 tons/per hectare. Emissions allowances per hectare for forest residues are several hundreds of euros depending on the going price for carbon dioxide emissions.

Sisältö

1	Johdanto	1
2	Energiapuuvarat	3
2.1	Energiapuun lähteet	3
2.1.1	Taimikoiden pienpuu	5
2.1.2	Ensiharvennuspuu	6
2.2	Hakkuutähdepotentiaali	7
3	Metsähakkeen hankinnan tekniikka	10
3.1	Metsähakkeen hankinnan logistiikka	10
3.2	Metsähakkeen tuotantomenetelmät	12
3.2.1	Palstalla haketus	12
3.2.2	Tienvarsihaketus	14
3.2.3	Käyttöpaikalla murskaus	15
3.2.4	Terminaalihaketus	17
3.3	Hakkuutähteen kasaus hakkuukoneella	18
4	Hakkuutähteen korjuun ympäristövaikutukset	20
4.1	Metsätalouteen liittyvät vaikutukset	20
4.1.1	Maanmuokkauksen helpottuminen	20
4.1.2	Uudistumisen parempi onnistuminen	21
4.1.3	Hakkuutähteen poiston vaikutus taimikon kasvuun	23
4.1.4	Metsänterveys	24
4.2	Vaikutukset metsämaan ravinnetalouteen	26
4.2.1	Maaperän sisältämät ravinteet	26
4.2.2	Hakkuutähteen keruun vaikutukset metsämaan ravin- nevaroihin ja ravinteiden käyttöön	28
4.3	Vaikutukset hiilivarastoihin	34
4.4	Vaikutukset metsämaan eliöstöön	35
4.4.1	Sienet, mikrobit ja pieneliöstö	35
4.4.2	Metsätähteen talteenoton vaikutus luonnon monimuo- toisuuteen ja uhanalaisiin lajeihin	37
4.5	Happamoituminen	39
4.6	Vesistövaikutukset	40
4.7	Energiapuun korjuun vaikutus metsien monikäyttöön	43
4.7.1	Marjastus ja sienestys	43
4.7.2	Metsästys	44
4.7.3	Retkeily	44
4.8	Ravinteiden palauttaminen tuhkalannoituksella	45

4.8.1	Tuhkan ominaisuudet	45
4.8.2	Tuhkalannoitukseen soveltuvat kohteet	46
5	Laskelmien lähtötiedot ja menetelmät	47
5.1	Laskelmien lähtötiedot	47
5.2	Laskentamenetelmä: hakkuutähteiden vaikutus metsän uudistamiseen	47
5.3	Laskentamenetelmä: menetettyjen ravinteiden taloudellinen arvo	50
5.4	Laskentamenetelmä: hakkuutähteellä tuotetun energian arvo päästökaupassa	53
6	Tulokset	55
6.1	Hakkuutähdekasojen aiheuttama kustannus metsänuudistamisessa	55
6.2	Hakkuutähteiden keruussa menetettyjen ravinteiden määrä ja arvo	57
6.3	Hakkuutähteiden arvo päästökaupassa	61
6.4	Tuhkalannoituksen taloudellinen kannattavuus	61
6.5	Yhteenvedo eri parametrien kustannuksista	62
7	Tulosten tarkastelu ja epävarmuustekijät	63
	Epävarmuusanalyysi	65
8	Johtopäätökset	66
	Kiitokset	68
	Lähdeluettelo	69

1 Johdanto

Suomessa suurin metsänomistajaryhmä on yksityiset kotitaloudet. Muita metsänomistajaryhmiä ovat mm. metsäyhtiöt, kunnat, seurakunnat, valtio sekä eri yhteisöt. Metsälaki edellyttää, että avohakkuun jälkeen maanomistajan on huolehdittava uuden puuston perustamisesta, eli metsän uudistamisesta. Nykyään metsänomistajien arvot ja tavoitteet metsän hoidolle ovat hyvinkin vaihtelevia ja siksi toteutuksessa on mahdollista käyttää eri menetelmiä.

Metsänomistajan päätettävissä on uudistamisen käytännön toteutus, mutta vastuu metsän uudistamisesta päättyy vasta kun perustettu taimikko on todettu vakiintuneeksi, eli riittävän tiheäksi ja kasvukelpoiseksi. Yleensä taimikon vakiintuminen todetaan 3–5 vuoden kuluttua metsän uudistamisesta. Tulevan puuston optimaalinen tiheys ja onnistunut kasvuun lähtö on metsän uudistamisen tavoitteena. Kaiken ohella on yleensä pyrkimys toteuttaa toimenpiteet mahdollisimman taloudellisesti, jotta talousmetsän hoidon kannattavuus säilyisi riittävänä.

Hakkuutähteiden keräämisen taloudellisten vaikutusten arvioinnissa on useita epävarmuustekijöitä. Luonnonolosuhteet vaihtelevat huomattavasti eri kohteissa ja siten myös ihmisen toiminnan vaikutukset luontoon. Luonnon puskurointikyky lieventää ympäristövaikutuksia suhteellisen paljon, mutta luonnon puskurointikykykin vaihtelee ja muutokset voivat olla nopeita kun raskas kasvaa liikaa.

Kohteena olevia työmaita voidaan arvioida metsämaan kasvupaikan ravinteisuuden ja maapohjan ominaisuuksien mukaan sekä maantieteellisen sijainnin mukaan. Näiden tekijöiden lisäksi paikallinen topografia, eli maanpinnan muodot vaikuttavat seurannaisvaikutuksiin, samoin esimerkiksi alueelle tuleva saastelaskeuma.

Suomessa ja Ruotsissa on tutkittu melko runsaasti hakkuutähteiden keräämisen vaikutuksia, mutta pitkäaikaisista tutkimuksista saatavia tuloksia on vielä niukasti. Tuloksista voidaan päätellä vaikutusten suuruusluokka, mutta tarkkojen taloudellisten tulosten saaminen on lähes mahdotonta. Tutkimustuloksista voidaan kuitenkin arvioida myös taloudellisten vaikutusten suuruusluokka, vaikka tulokset ovatkin epätarkkoja.

Ravinnetasapainolla voi olla suurikin merkitys vuosikymmenten ja -satojen kuluessa, ja siksi kysymys on tärkeä. Tällä hetkellä metsänomistaja luovuttaa hakkuutähteet ilman korvausta tai pienehköä korvausta vastaan. Metsänomistajan on tärkeää tietää, onko hakkuutähteiden keräämisellä haittavaikutuksia, jotka tekisivät hakkuutähteiden luovuttamisen pienehköllä korvauksella kannattamattomaksi. Vastaavasti energiateollisuuden ja viranomaisien on

tiedettävä hakkuutähdehakkeen hankinnan ekologiset vaikutukset, jotta voidaan tehdä oikeat johtopäätökset toiminnan järkevyydestä.

Maailmassa käytetään vuosittain 3,2 miljardia m³ puuta: puolet teollisuuden raaka-aineeksi, puolet suoraan polttopuuksi. Energiakäyttö keskittyy kehitysmaihin, teollisuusmaissa puuta käytetään pääasiassa teollisuuden raaka-aineeksi. Suomessa metsistä käytettiin kuorellista puuta vuonna 2006 noin 82 milj. m³. Siitä 6 milj. m³ ohjautuu energian tuotantoon ja loput mekaanisen ja kemiallisen metsäteollisuuden käyttöön. (Metsätilastollinen vuosikirja 2007)

Energiakäyttöön päätyy itse asiassa yli 40 % metsistämme korjatusta kuorellisesta runkokuusta, kun huomioidaan energiaksi päätyvät prosessitähteet: kuori, puru, muu puutähte sekä sulfaattiseluteollisuuden jäteliemi. Näin ollen puupolttoaineiden osuus Suomen primäärienergian kulutuksesta on yhteensä 18 %.

Nykyiset ilmastopöytäkirjat tähtäävät kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen tulevina vuosikymmeninä. Tämä edellyttää fossiilisten polttoaineiden korvaamista uusiutuvilla polttoaineilla suuressa mittakaavassa.

Ennen kokematon työttömyys, fossiilipolttoaineiden rajallisuus sekä yleismaailmallisten ympäristöuhkien kärjistymisen muovaavat asenteita puuperäiselle energialle myönteisiksi myös teollisuusmaissa. Fossiilisista polttoaineista vapautuu ilmakehään hiilidioksidia, joka aiheuttaa kasvihuoneilmiötä. Puun poltossakin vapautuu hiilidioksidia ilmakehään. Puun osalta kyseessä on kuitenkin hiilen luonnollinen kiertokulku. Kestävän puuntuotannon olosuhteissa puun lahoamisessa ja poltossa vapautuva hiilidioksidi sitoutuu ennen pitkää takaisin kasvavan puuston biomassaan. Kun puuta kasvaa enemmän kuin sitä hakataan, sitovat metsät enemmän hiilidioksidia kuin sitä vapautuu, tällöin metsät toimivat ns. hiilinieluinä.

Ongelman torjumiseksi on rajoitettava öljyn ja kivihiilen käyttöä energiaa säästämällä ja vaihtoehtoisiin energialähteisiin turvautumalla. Suomessa puun energiakäyttö lisääntynyt viime vuosina huomattavasti, ja lähitulevaisuuden laitosinvestoinnit tulevat lisäämään kasvua vielä entisestään. Tähän asti puuenergian lisäkäyttö on tullut pääasiassa teollisuuden sivutuotteista puun lisäntyneiden käyttömäärien ansiosta.

Valtaosa nykyisin käytettävästä puuenergiasta on metsäteollisuuden jäteliemiä ja puujalostuksen sivutuotteita kuten purua ja kuorta. Mikäli puupolttoaineiden käyttöä halutaan nykytasosta vielä huomattavasti lisätä, on lisättävä metsähakkeen hankintaa, koska ainespuun hakkuut ovat jo lähellä suurinta kestävää tasoa.

Metsähakkeen raaka-ainetta on metsissämme runsaasti. Periaatteessa kaikki metsäteollisuuden käyttöön soveltumaton puuaines on teknisesti käytettävissä energiaksi. Taloudellisesti kannattavinta on kerätä uudistusalojen hakkuutähteitä. Hakkuutähteiden keräämisellä on lukuisia ympäristövaikutuksia, joita tässä teoksessa myöhemmin selvitetään. Metsänomistajan kannalta hakkuutähteiden keruun taloudelliset vaikutukset ovat tärkeitä, sillä varsinaista kantorahaa ei hakkuutähteistä Suomen hintatasoilla voida nykyisin maksaa.

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää hakkuutähteiden keräämisen ympäristövaikutusten lisäksi metsätaloudellisia vaikutuksia. Tutkimuksessa arvioidaan myös, mikä on hakkuutähteellä tuotetun energian arvo päästökautta verrattuna uusiutumattomilla polttoaineilla tuotettuun energiaan.

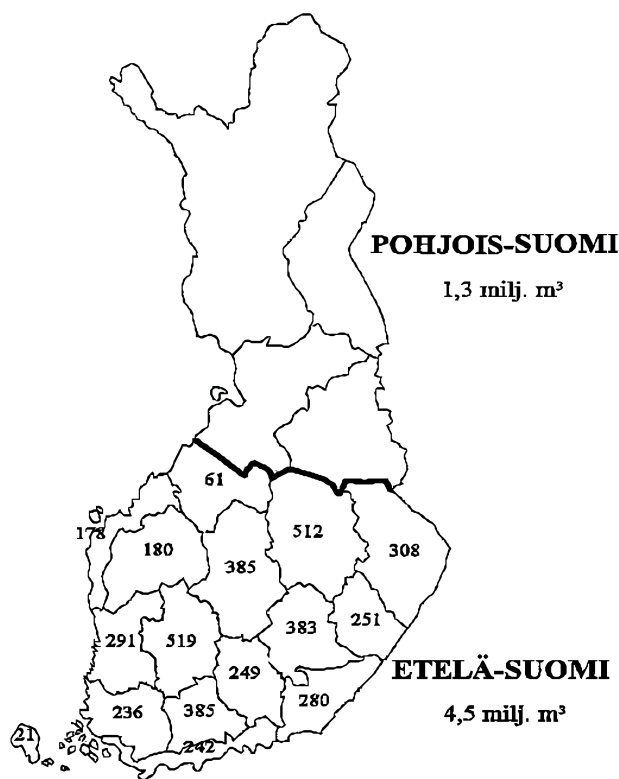
2 Energiapuutarat

2.1 Energiapuun lähteet

Suomen metsien kaiken maanpäällisen biomassan kasvu on 110 milj. m³ vuodessa. Kokonaispoistuma on 85 milj. m³, josta runkopuuta tulee hyötykäyttöön 56 milj. m³. Jäljelle jäävä 29 milj. m³ jää metsään hukkarunkopuuna, latvusmassana ja luonnonpoistumana. Runkopuun poistuma oli vuonna 1994 62 milj. m³, joka sisälsi noin 55 milj. m³ käyttöpuuta, 1–2 milj. m³ luonnonpoistumaa ja 5 milj. m³ hakkuutähteeksi jäävää hukkarunkopuuta. Kasvu ylittää poistuman, joten puuvaramme karttavat vuosittain n. 1 %:lla. Tämä kertyvä puumäärä toimii samalla hiilinieluna, eli se kompensoi teollisuudessa, lämmityksessä ja liikenteessä vapautuvia hiilipäästöjä. Katso kuva 1 (s. 4). (Hakkila & Fredriksson 1996)

Suomen metsissä teollisen käytön ulkopuolella olevat biomassareservit voidaan jakaa kahteen luokkaan: hakkuusäästö ja hakkuutähde. Hakkuusäästöön kuuluu sekä ainespuuksi luokiteltava puuaines, joka sijaitsee suojeltavissa kohteissa että teollisuudelle eri syistä soveltumattomat hakkuukohteet. Hakkuusäästöä on luokiteltavissa potentiaalisesti energioreserviksi lähinnä markkinakelvoton pieniläpimittainen puu, jonka teollista hyödyntämistä vaikeuttaa pieni läpimitta. Hakkuutähde kuuluu kokonaisuudessaan potentiaaliseen energioreserviin, sillä sen jalostaminen ei ole nykytekniikoilla järkevää. (Hakkila ym. 1998).

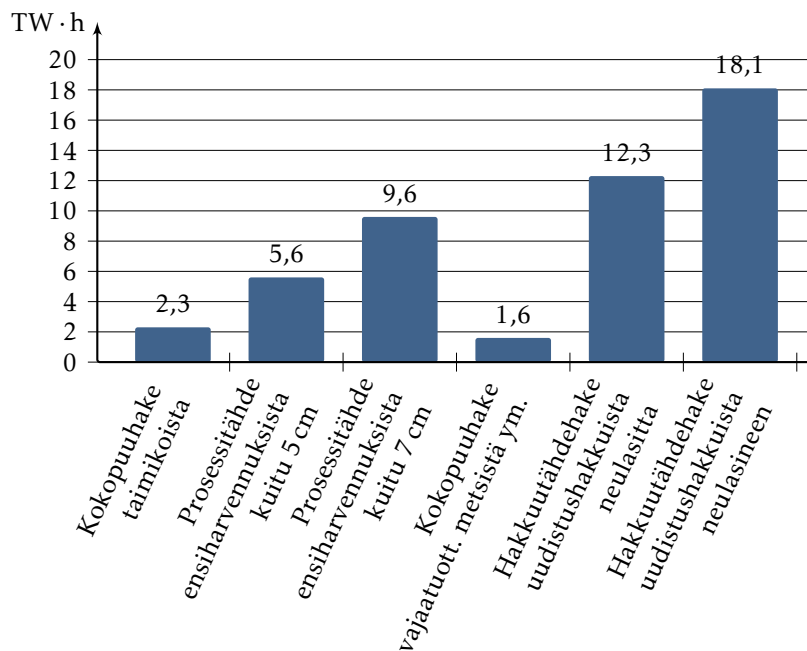
Energiapuun tärkeimmät lähteet päätehakkuualojen hakkuutähteen lisäksi ovat taimikoiden harvennuspuu, ensiharvennuksien yhteydessä saatava pienpuu, vajaatuottoisista metsiköistä poistettava yleensä lehtipuuvaltainen pienpuu sekä Etelä-Suomen tyvilahovikainen kuusipuu. Energiioreserviin ei sisäl-



Kuva 1: Kestävien hakkuumahdollisuuksien mukainen energiapuukertymä 55 mk/(MW·h) tuotantokustannustasolla metsälautakuntien alueilla (1 € = 5,95 mk). Etelä-Suomen lääneittäin ilmoitetut lukuarvot ovat 10³ m³. (Bioenergia, 1997)

lytetä teollisuuden raaka-aineeksi soveltuvaa puuta, sillä kansantalouden kannalta sellun, sahatavaran ja paperin valmistus on energiakäyttöä hyödyllisempää. Korjuukelpoinen metsäenergiareservi on esitetty kuvassa 2 (s. 5).

Eräs paikallisesti merkittävä energiapuun lähde on turvetuotannon yhteydessä kertyvät kannot. Jyrsinturvetta nostettaessa suossa oleva puuaines pyritään erottelemaan polttoturpeen seasta. Turpeen seassa polttoon menevät puupalat ja tikut aiheuttavat häiriöitä lämpölaitoksen kuljettimissa. Pienet puukappaleet sekoittuvat jyrsinturpeen sekaan, mutta suuremmat kappaleet jäävät kentälle. Kun puuta on kertynyt liikaa tuotantoalueelle, on puuaines poistettava kasaan tuotantoalueen laitaan. Kun puuaines kasataan hyvin ja kuivumisesta huolehditaan, saadaan erinomaista hakeraaka-ainetta. Turvesuokantojen haketus on mahdollista normaaleilla rumpuhakkureilla, sillä turmailta kerätyissä kannoissa ei ole kiviä ja hiekkaa, kuten kangasmailta kerätyissä kannoissa on.



Kuva 2: Korjuukelpoinen metsäenergiareservi. Ensiharvennusleimikoiden energiapuupotentiaaliin vaikuttaa kuitupuun vähittäisläpimittavuus. (Hakkila & Fredriksson 1996)

2.1.1 Taimikoiden pienpuu

Kun uudistusalalle on vakiintunut taimikko, sen ensimmäinen hoitotoimenpide on taimikon perkaus tai harvennus. Tällöin poistetaan taimien kehittymistä haittaava vesakko ja harvennetaan taimikko tavoitetiheyteen. Poistettavan puuston taloudellinen kerääminen ei kuitenkaan nykytekniikalla ole useinkaan mahdollista, koska puusto on pienikokoista ja hehtaarikohtainen kertymä on liian pieni. Kun taimikon valtapituus on n. 4–7 m ja puuston kehitys vaatii harventamista, tehdään taimikon harvennus. Tällöin raivataan aluspuusto ja harvennetaan taimikko jatkokasvatukselle ja koneelliselle harvennukselle sopivaksi. Tavoitteena on jäävän puuston järeytymisen turvaaminen ja metsämaan kasvupotentiaalin kohdistaminen taloudellisesti arvokkaille puille.

Taimikon harvennuksessa kertyvä puusto on osittain luettavissa korjuukelpoiseen energiapuureserviin. Nykyisin suuri osa taimikonhoitotöistä on jäänyt kokonaan tekemättä tai viivästynyt, joten suurin osa tällä hetkellä toteutettavista taimikonhoitotöistä tehdään puuston pituuden ollessa yli 4 m. Tekemättömät taimikonhoitotyöt aiheuttavat kasvavan puuston riukuuntumista ja

kasvutappioita Puusto riukuuntuu kun kasvavaa tiheää taimikkoa ei harvenneta ajoissa. Puut kilpailevat valosta ja kasvavat pituutta paksuuskasvun jäädessä vähäiseksi. Tällöin puuston elävän latvuksen osuus pienenee jatkuvasti ja runko jää ohueksi. Seurauksena on ainespuun kasvu hidastuu ja puiden lumituhoriski lisääntyy. Käytännössä tällaisen metsän harvennuksessa jäävä puusto on jätettävä ylitieheäksi, jotta mahdollisten lumituhojen jälkeen jää riittävästi kasvatuskelpoisia puita. Tällaisessa metsässä ensimmäinen kaupallinen hakkuu on heikosti kannattava, sillä ainespuuta kertyy vähän ja korjuuolosuhteet ovat puuston tiheyden vuoksi huonot. Tällä hetkellä metsäteollisuus ei ole kiinnostunut huonoista ensiharvennusleimikoista niiden korkeiden korjuukustannusten takia. METLA:n tekemissä laskelmissa oletetaan, että pitkällä tähtäyksellä kolmannes taimikoiden harvennusala täyttää korjuukelpoisuusvaatimukset, eli vuosittain n. 65 000 ha. Jos talteenottoaste olisi 75 % biomassasta, taimikoiden harvennuspuusta muodostuva potentiaalinen energiareservi olisi 1,2, milj. m³ energiapuuta, eli 2,3 TW · h bruttoenergiaa vuodessa. (Hakkila, Fredriksson 1996)

Nykyisillä puuenergian hinnoilla taimikoitten harvennuspuun kaupallinen hyödyntäminen edellyttää tukea metsänparannusvaroista. Nykyisen kestävä metsätalouden rahoituslain mukaisesti taimikoitten harvennuspuun hyödyntäminen on kannattavaa parhaimmilla kohteilla, joissa energiapuun kertymä on riittävä ja leimikko-olosuhteet hyvät. Lisäksi kohteen on oltava järkevällä etäisyydellä haketta käyttävästä laitoksesta.

2.1.2 Ensiharvennuspuu

Metsikön ensimmäinen kaupallinen harvennus tehdään olosuhteista riippuen yleensä 25–50 vuoden iällä. Tällöin harvennetaan edelleen kasvavaa puustoa, jotta puusto säilyttää kasvukykynsä ja jäljelle jäävän puuston laatu vastaa teollisuuden odotuksia.

Ensiharvennuksissa puuston järeys vaikuttaa huomattavasti korjuukustannuksiin. Kannattavan ensiharvennuksen edellytyksenä onkin riittävän myöhään tehty ja voimakas taimikon harvennus. (Hakkila & Fredriksson 1996)

Metsiemme ensiharvennustarve on arvioitu valtakunnan metsien inventoinnin yhteydessä. Ensiharvennuksia tulisi toteuttaa lähitulevaisuudessa vuosittain n. 210 000 ha. Tällä hetkellä metsäteollisuuden kuitupuun vähimmäisläpimittavaatimus on 7–8 cm kuoren päältä mitattuna. Tällöin ensiharvennuspuuston latvat oksineen voidaan lukea energiapuupotentiaaliin. Siinä tapauksessa ensiharvennusleimikoiden energiapuun käyttöpotentiaali olisi yhteensä 5,1 milj. m³ eli 9,6 TW · h vuodessa. Mikäli teollisuus käyttäisi runkokuun

5 cm:n läpimittaan saakka, pienenisä energiapuupotentiaali 4,0 TW · h. (Hakkila & Fredriksson 1996)

Ensiharvennusleimikoilla toteutettavan ainespuun ja energiapuun korjuun kustannukset on tällä hetkellä rajoittava tekijä. Metsänparannusvaroista on saatavissa tukea ensiharvennuksiin, joissa kuitupuun kertymä on pieni. Kuitupuun kertymän raja vaihtelee Metsäkeskuksittain, Keski-Suomessa kuitupuuta saa kertyä alle 35 m³/ha. Ensiharvennusrangan hyödyntäminen on taloudellisesti kannattavaa leimikko-oloiltaan hyvillä kohteilla, silloin kun nuoren metsän hoitotuen ehdot täyttyvät. Lisäksi kohteen on oltava järkevällä etäisyydellä haketta käyttävästä laitoksesta. (Tiedot ovat vuodelta 1996)

Yksi korjuuvaihtoehto on kuitupuun ja energiapuun integroitu korjuu, jossa puuaines viedään karsimattomana osapuuna tehtaalle tai puunkäsittelyterminaaliin, jossa energiapuuosite erotetaan joukkokarsintaa ja -kuorintaa käyttäen. Viime vuosina integroitu korjuu ei ole yleistynyt.

Metsiemme kasvu ylittää tällä hetkellä poistuman, joten puuvaramme karttuvat vuosittain 1 %:lla. Jatkossakaan puun tarjonta ei nouse yhtä suureksi kuin kasvu. Syynä on suojelualueiden lisääntyminen, uudet metsänhoitosuositukset ja puuntuotannon toissijainen merkitys metsänomistajien arvomaailmassa. Lähes kaikelle markkinoille tulevalle puutavarakkeelle, joka täyttää metsäteollisuuden laatu- ja leimikkovaatimukset, löytyy kysyntää raaka-aineeksi. Ainoa energiakäyttöön mahdollisesti joutava ainespuulaji on ensiharvennuksilta kertyvä pieniläpimittainen kuitupuun.

2.2 Hakkuutähdepotentiaali

Hakkuualalle jäävää hukkarunkopuuta ja latvusmassaa ja kantoja kutsutaan yhteisnimikkeeltään hakkuutähteeksi. Hukkarunkopuuta syntyy hakkuussa teollisuuden ainespuuta valmistettaessa. Hukkarunkopuu ei täytä teollisuuden laatu- tai mittavaatimuksia ja jää siksi käyttökelvottomana metsään. Kuitupuun minimiläpimitta vaikuttaa hukkarunkopuun määrään. Minimiläpimittaa vaikuttaa siihen, kuinka paljon rungon latvasta jää käyttämättömäksi. Hukkarunkopuuhun kuuluvat myös metsään jäänyt valmis puutavara sekä lahot tyveykset, jotka ovat jääneet metsään. Merkittävin hukkarunkopuun lähde Etelä-Suomessa on tyvilahot kuusikot, joista kertyy paikoitellen huomattavasti lahovikaisia pölkkyjä.

Latvusmassaan luetaan kuuluvaksi puun elävät ja kuolleet oksat neulasineen (Hakkila ym. 1998). Latvusmassan osuus koko puun biomassasta vaihtelee puulajeittain ja kasvupaikoittain. Kuusella latvusmassan osuus on suurin, männyllä ja koivulla huomattavasti pienempi. Rehevillä mailla latvusmassa

osuus on suurempi kuin karuilla maapohjilla. Tiheässä kasvaneissa puissa oksat ovat karsiutuneet ylemmäs kuin harvassa asennossa kasvaneilla. Hakkuutähdettä kerätäänkin pääasiassa kuusikoiden avohakkuilta.

Hakkuutähteiksi jääviä kantoja ei ole taloudellisesti järkevää käyttää selluteollisuuden raaka-aineena. Sen sijaan energiakäyttöön kantoa on viime vuosina alettu keräämään parhailta kohteilta.

Hakkuutähdettä voidaan korjata joko heti hakkuun jälkeen tuoreena neulasineen tai kesäkauden jälkeen kuivahtaneena, jolloin huomattava osa neulasista sekä pieni määrä kuorta ja ohuita oksia jää hakkuualalle. Kuivahtanutta hakkuutähdettä korjattaessa talteen saanto pienenee ja korjuun kannattavuus heikkenee. Toisaalta kuivana kerätyn hakkuutähteen energiasisältö tilavuus- tai massayksikköä kohden on parempi. Ruotsissa hakkuutähteet kerätään usein neulasitta, jotta neulasten sisältämä ravinnemäärä jää hakkuualalle. Suomessa hakkuutähteet on kerätty yleensä tuoreena neulasineen (Alakangas ym. 1999).

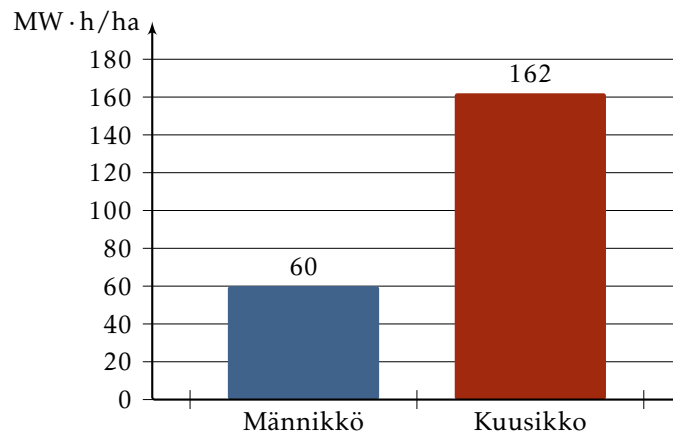
Uudistushakkuualoilta energiapuun keruu on taloudellisesti kannattavinta, sillä tähdettä on paljon pienellä alalla, pystytuusto ei haittaa keruuta ja talteenotto voidaan yhdistää osittain runkopuun korjuuseen. Hakkuutähdehakkkeen lämpöarvo on korkea, sillä neulasten ja kuoren lämpöarvo ylittää runkopuun lämpöarvon.

Hakkuukypsän varttuneen metsän latvusmassassa on runkopuuhun verrattuna lisäraaka-ainetta männyllä 21 %, kuusella 54 % ja koivulla 16 % (Hakkila 1991). Runkopuun kuorellisesta massasta jää hakkuutähteeksi 2–5 %. Etelä-Suomen tyypillisellä avohakkuualalla tähteen määrä on neulasen mukaan lukien männikössä noin 50 m³ ja kuusikossa noin 120 m³. Bruttoenergiasisällöltään määrät vastaavat 95 ja 230 MW · h/ha. Katso kuva 3 (s. 9).

Päätehakkuualojen tähde on metsäenergiälähteistämme mittavin. Neulasten talteenotolla on suuri merkitys kertymän kannalta, sillä neulasten määrä on kuusella noin kolmannes hakkuutähdemäärästä ja niiden lämpöarvo on hyvä. Toisaalta neulasen sisältävät paljon puiden kasvulle tärkeitä ravinteita, jotka poistuessaan metsämaasta köyhdyttävät maaperää.

Metsiimme vuosittain jäävän hakkuutähteen ja luonnonpoistuman energiasisältö on 60 TW · h. Tämä luku on hakkuutähteen korkein teoreettinen energiapotentiaali. Edellä mainittu määrä vastaa 15–20 % primaarienergian kokonaiskulutuksestamme. Teoreettista potentiaalia rajoittaa kuitenkin joukko teknis-taloudellisia ja ekologisia rajoitteita, jotka on huomioitava raaka-ainevarojen arvioitaessa:

- Varttuneiden metsien harvennushakkuilta ei kannata kerätä hakkuu-



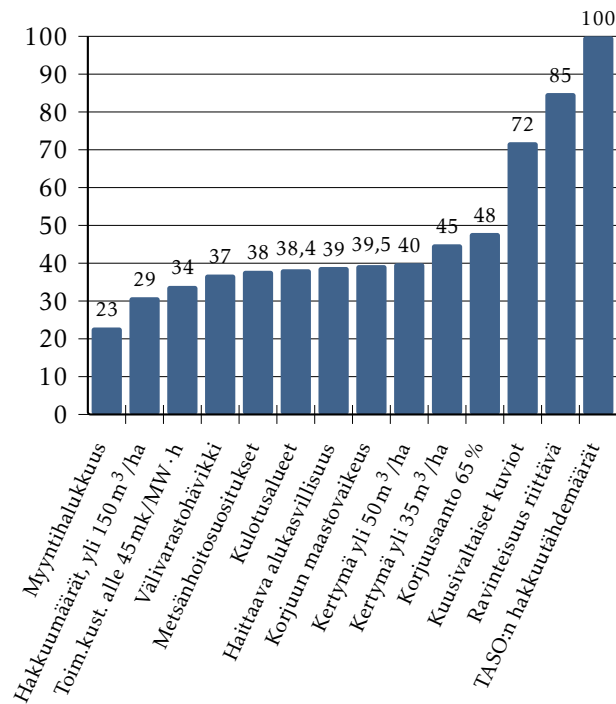
Kuva 3: Hakkuutähteen hehtaarikohtaista kertymää vastaavat lämpöarvot MW · h/ha. Laskelmassa on oletettu hakkuutähteen kosteusprosentiksi 40 % ja talteenottoaannoksi 70 % kokonaismäärästä. (Nurmi & Kokko, 2001)

tähteitä ekologisten ja taloudellisten syiden vuoksi. Näin ollen 25 % potentiaalista jää mahdollisuuksien ulkopuolelle.

- Leimikon vähimmäiskoko. Hakkuutähteen keruutekniikasta riippuen avohakkuista rajautuu kannattamattomina pois 0–20 %.
- Talteenoton tarkkuus. Hakkuutähdettä ei tule missään leimikko-oloissa kerätä talteen täysimääräisesti. Näin toimien keruu on nopeampaa, epäpuhtauksien riski pienenee ja metsään jää riittävästi biomassaa.
- Neulasten varistaminen palstalla ennen hakkuutähteen keruuta ja haketusta. Kuivuessaan kesän yli palstalla hakkuutähteestä karisee neulasia ja ohuita oksia n. 15–30 % biomassasta. Myös keruu vaikeutuu kun kasat painuvat maata vasten.
- Ekologisesti herkät kasvupaikat. Ravinneköyhät maat sekä erittäin kiviset ja niukkahumuksiset maat tulee jättää hakkuutähteen keruulta sivuun.
- Edellä mainittujen rajausten pohjalta syntyy arvio korjuukelpoisten hakkuutähtereservin määrästä. Kuljetusetäisyyksistä johtuvia taloudellisia rajoitteita ei ole otettu vielä huomioon.

Korjuurajoitteiden vaikutusta hakkuutähteen tuotantopotentiaaliin on tarkasteltu Saarijärven yksityismetsissä. Saatuja tuloksia voidaan käyttää suuntaa antavina Etelä-Suomen osalta. Lähtökohtana on käytetty Keski-Suomen metsäkeskuksen aluesuunnitelmien TASO-tietoja, joista peruspoimintana ovat olleet kaikki kuviot, joille on metsäsuunnittelun yhteydessä ehdotettu uudistushakkuuta. Tämän jälkeen aineistossa on otettu huomioon kaikkien hakkuu-

tähteen korjuuseen liittyvien tekijöiden vaikutus. Tarkastelun perusteella saataisiin hakkuutähdettä talteen yhteensä vain n. 23 % kokonaispotentiaalista. Katso kuva 4 (s. 10). (Kauppinen 1996)



Kuva 4: Eri tekijöiden vaikutus hakkuutähteen korjattavissa olevaan määrään. TASON mukaisten uudistushakkuiden koko hakkuutähdemäärä on suhdeluku 100. (Koskenranta & Reiman, 1997)

3 Metsähakkeen hankinnan tekniikka

3.1 Metsähakkeen hankinnan logistiikka

Puupolttoaineen logistiikkaketjussa raaka-aineen lähteeksi oletetaan metsät, jotka sijaitsevat kohtuullisella etäisyydellä laitoksesta. On olemassa useita erilaisia puupolttoaineiden tuotantotekniikoita, joiden varaan polttoaineen hankinta voidaan perustaa. Logistiikan kannalta lähtökohtana ovat leimikot, joilta on teknisesti mahdollista kerätä puupolttoaineeksi soveltuvaa puuainesta. Kysyntä ja taloudelliset seikat määrittelevät sen, mitkä leimikot kannattaa käsitellä ja millä tekniikalla. (Laitinen 1993)

Metsähakkeen hankintaan on kehitetty erilaisia korjuuketjuja, joilla metsähakkeen hankinta saataisiin kannattavaksi. Suomessa metsähakkeesta saatava

hinta on huomattavasti alhaisempi kuin esim. Ruotsissa. Siksi Ruotsissa pitkälle kehitetty tekniikka ei ole suoraan käyttökelpoinen Suomen olosuhteisiin. Suomessa Bioenergian tutkimusohjelmassa puuenergian tavoitehinnaksi on asetettu 7,6 €/ (MW · h) 100 km:n toimitusetäisyydellä.

Puupolttoaineiden hankintalogistiikan suunnittelussa voidaan hyödyntää tietokonesimulointia. Simuloinnin lähtötiedoiksi tarvitaan paikkatietojärjestelmään perustuvat tiedot alueen puupolttoainepotentiaalista. Potentiaalisten leimikoiden määrän ja sijainnin perusteella voidaan valita olosuhteisiin sopivin hankintaketju. Erityisen tärkeää on selvittää kuljetusten ja välikäsitteilyn sekä välivarastoinnin merkitys. On paljon halvempaa kuljettaa esimerkiksi haketta kuin kokopuuta oksineen (Laitinen 1993). Hakkuutähteen kuljetus edellyttää kuorman tiivistämistä, sillä muuten kuorma on liian pieni ja kevyt eikä kuljetuskaluston kantavuutta pystytä hyödyntämään.

Eri hankintaketjuilla on hieman toisistaan poikkeavia ympäristövaikutuksia. Tämä johtuu siitä, että raaka-aineen kuljetus on järjestetty eri tavoin. Hakeutus tai murskaus suoritetaan eri vaiheessa toimitusprosessia ja raaka-aineen mahdollinen kuivaus voidaan toteuttaa monin eri tavoin.

Puupolttoaineiden hankinnan logistiikka nivoutuu osaksi teollisuuden puun hankintaa sekä energiaturpeen hankintaa. (Laitinen 1993) Samalla alueella toimiessaan eri organisaatiot voivat hyödyntää kalustoaan myös puupolttoaineen hankintaan, jolloin investointikustannus ei kohdistu kokonaan puupolttoaineen hankintaan. Eri käyttäjien vaatimukset polttoaineen laadulle vaihtelevat, joten laatuvaatimukset on huomioitava jo hankintaketjun valinnassa.

Hakkuutähdehakkeen hankinnassa kustannuksia aiheuttaa hankintaketjun organisoiminen, sillä hakkuutähteen keräämiseen, kuljetukseen metsästä tienvarteen, haketuksen tienvarsivarastolla, hakkeen varastointiin ja kuljetukseen asiakkaalle tarvitaan erikoiskalustoa. Hakkuutähteen kerääminen ja kuljetus tienvarteen onnistuu metsätraktoreilla ja helpossa maastossa nelivetomaataloustraktorilla. Edellytyksenä on hakkuutähteen keräämiseen soveltuva koura, jolla vältetään kivien ym. maa-ainesten joutuminen puutavaran sekaan. Kuormatilan laajennus on tarpeen, jotta kuljetuskustannus pysyy kohtuullisena.

Toistaiseksi yleisesti on käytetty hakkuutähteen varastointia tienvarsiaumoihin, joissa hakkuutähde kuivuu varastoinnin aikana. Peittämällä hakkuutähdeama vähennetään kosteuden lisääntymistä talvikaudella. Suomen oloissa varastot ovat melko pieniä. Siksi tienvarsihaketuksen hinta on säilynyt korkealla. Hakkuutähdeaman kooksi tulee keskimääräiseltä 1–2 ha:n avohakkuulta n. 100–300 i-m³.

Tuoreen hakkeen varastointi on huono vaihtoehto, sillä hakeaumassa kuivuminen on lähes olematonta. Siksi haketus tehdään yleensä suoraan kuorma-auton konttiin ja kuorma viedään suoraan käyttöpaikalle. Ongelmana on haketuksen ja raaka-aineen tarpeen yhdistäminen, mikäli halutaan välttyä turhilta koneiden odotteluilta ja hakkeen varastoinnilta. Vaihtoehtona oleva hakkuutähteen kuljetus varastoon käyttöpaikan lähelle on kannattamatonta hakkuutähteen pienen kiintotilavuuden vuoksi. Kuiva hake säilyy huomattavasti paremmin kuin tuore hake, siksi mahdolliset varmuusvarastot on tarkoituksenmukaista tehdä mahdollisimman kuivasta raaka-aineesta.

3.2 Metsähakkeen tuotantomenetelmät

Metsähakkeen hankinnan kehittämiseksi on kehitetty erilaisia toimituslogistisia ratkaisuja ja yhdistelmäkoneita, joilla voidaan vähentää työvaiheita ja kaluston tarvetta. Tavoitteena on saada sovitettua yhteen asiakkaan polttoaineen tarve ja hakeraaka-aineen hankinta ja varastointi. Metsähakkeen laatua pitäisi vielä parantaa, jotta asiakkaat pystyisivät sitä entistä enemmän käyttämään.

3.2.1 Palstalla haketus

Palstalla haketuksessa tavoitteena on puupolttoaineen keräämisen, lähikuljetuksen ja haketuksen kulujen vähentäminen yhdistämällä työvaiheet saman koneen tehtäviksi. Palstahakkureita on ollut käytössä Ruotsissa runsaasti ja siellä on kehitetty palstahaketukseen soveltuvia metsäkoneen alustalle rakennettuja ratkaisuja. Eräs kotimainen palstalla kulkeva palstahakkuri on Oy Logset Ab:n kehittämä CHIPSET 536C. Hakeharvesterin toiminnot ovat seuraavat:

- Poimii pieniä puita tai hakkuutähteitä eteen sijoitetulla nosturilla ja kouralla.
- Syöttää puut koneen eteen sijoitettuun hakkuriin, joka kääntyy 90 astetta molemmille sivuille, jolloin kone pystyy yhdellä ajokerralla poimaan puut ajouran molemmilta puolilta.
- Hakettaa puut, joiden suurin halkaisija on 350 mm.
- Syöttää hakkeen koneen taakse sijoitettuun 16 m³:n konttiin.
- Kuljettaa hakekuorman ulos metsästä.
- Tyhjentää hakekontin kippaamalla tien varteen sijaitsevaan irtokonttiin, vaihtolavaan tai irtoperävaunuun. (Rieppo & Poikela 1995)

Palstahaketuksen etuja ja toisaalta haittoja ovat mm. seuraavat:

- + Erillistä metsäkuljetusta ei tarvita haketettavalle materiaalille.
- + Hakkuutähteen välivarastointia ei tarvita.

- + Tienvarsitilan tarve on pieni.
- + Haketus ja autokuljetus eivät välttämättä muodosta kuumaa ketjua.
- Haketuskustannukset ovat välivarastolla haketusta korkeammat.
- Maapohjan on oltava melko tasainen ja kantava sekä metsäkuljetusmatkan melko lyhyt.
- Menetelmä soveltuu hyvin lähinnä sulan maan korjuuseen, sillä raaka-aineen kosteutta on vaikea hallita ympärivuotisesti toimittaessa (Nuuja 1996).

Skogforsk Ruotsissa on tutkinut ensimmäistä prototyyppiä. Tutkituissa olosuhteissa palstahakkurilla pystyttiin tuottamaan haketta 20–30 % halvemmin kuin menetelmällä, jossa pienpuut ja puun osat ensin kuljetettiin tienvarteen haketusta varten. (Rieppo & Poikela 1995)

Hakkeen palakoolla näyttää olevan merkittävä vaikutus haketuksen tuottavuuteen; käytettäessä normaalia suurempaa palakokoa tuottavuus oli 29 % suurempi. Parhaat tuottavuudet per (MW · h) saatiin haapakokopuun ja männyn latvaosan haketuksessa sekä hakettaessa normaalia ensiharvennuskokopuuta suurella palakoolla (Rieppo & Poikela 1995). CHIPSET 536C on suunniteltu alun perin harvennuksilta kertyvän puuaineksen keräämiseen, kuitenkin myös CHIPSET:illä edullisinta metsähaketta saadaan avohakkuulta.

Palstahaketuksen tuottavuus on melko korkea, mutta sitä haittaa korjuukohteiden hajanaisuus. Huomattava kohteiden keskittäminen on logistiikan ja kustannusten kannalta välttämätöntä. (Energiapuutyöryhmän muistio 1997) Palstahaketusketjun kaukokuljetus toteutetaan vaihtolavakonteina, sillä haakeharvesterin kippauskorkeus estää suoraan kuorma-auton lavalle kippaamisen. Kotimaiset laitokset on usein suunniteltu peräpurkulaittein varustetuille autoille. Näin ollen kippaavalla vaihtolavakalustolla hakkeen toimittaminen on mahdotonta tietyille lämpölaitoksille.

Ympäristövaikutusten kannalta palstahaketuksella on muutamia etuja muihin menetelmiin nähden:

- Haketus tapahtuu metsässä, joten vältytään ojien ja tienvarsien likaantumiselta kunhan kuorman kippaaminen vaihtolavalle tehdään huolellisesti.
- Osa raaka-aineesta on mahdollista kuivata palstalla kesän yli, jolloin karisevat neulaset jäävät hakkuualalle.

Negatiivisia tekijöitä ympäristön kannalta ovat:

- Pienillä leimikoilla tehotonta energiankäyttöä: siirrot ja muut työvaiheet kuluttavat energiaa suhteessa tuotettavaan hakkeeseen runsaasti.

- Metsässä ajettava määrä lisääntyy runsaasti, joten maaston kulutuskestävyys on koetuksella, samoin puusto- ja juuristovaurioiden riski lisääntyy.
- Tuoreen raaka-aineen paino rajoittaa kaukokuljetuksessa talviaikaan kuorman määrää, joten kuljetukseen kuluu turhaa energiaa tuotettua lämpöä kohden.

3.2.2 Tienvarsihaketus

Tienvarsihaketukseen perustuva puupolttoaineen hankintaketju on yleisesti käytössä koko Suomessa. Hakkuutähde kerätään hakkuualalta joko tavallisella metsätraktorilla ainespuun hakkuun ja kuljetuksen yhteydessä tai eri kalustolla ainespuuhakkuun jälkeen. Hakkuutähde varastoidaan tienvarsikasaan, josta se haketetaan yleensä kuorma-autosovitteisella rumpuhakkurilla suoraan kuorma-autoon. Tienvarsivarastoinnissa voidaan hakkuutähdettä kuivata ennen haketusta, mikäli se on tien kantavuuden ja toimitusaikataulujen mukaan mahdollista. (Metsätehon tiedotus 1984)

Käytettäessä tavanomaista puutavaran kuljetukseen suunniteltua metsätraktoria, vältetään ylimääräisiltä konesiirroilta. Vakiorakenteisen kuormatraktorin tuottavuus hakkuutähteen ajossa jää pienen kuormatilan takia heikoksi. Hakkuutähteen pienen tuoretiheyden (80–150 kg/oksa i-m³) vuoksi kuorman massa jää koneen kantavuuden alapuolella (Sauranen & Vesisenaho 1996). Tavallinen puutavarakoura ei sovellu hakkuutähteen kuormaukseen, sillä se nostaa huulilevyn päällä helposti maa-ainesta. Myös taakkojen koko jää hakkuutähdekouraa pienemmäksi.

Mikäli hakkuutähde kerätään eri kalustolla ainespuuhakkuun jälkeen, voidaan kuormatraktori varustaa hakkuutähteen kuljetukseen sopivaksi. Tällöin kuormatila voidaan laajentaa taaksepäin, sivulle ja ylöspäin. Sivulle laajentamista rajoittaa ajouran leveys, sillä hakkuutähdekuorma joudutaan ajamaan toisinaan pystymetsän läpi. Kuormatilan pidentäminen ja leventäminen parantaa yleisesti ottaen koneen stabiiliteettia (Kuitto 1983). Mäkisessä maastossa tosin kuorman takapainoisuus voi heikentää koneen ajettavuutta (Pitkänen, suullinen tiedonanto 1997). Kuorman kasvattaminen ylöspäin on mahdollista kuormaimen nostokorkeuteen saakka. Tällöin tarvitaan pidennetyt pankot (sivupylväät) kuormatilan korottamiseksi. (Sauranen & Vesisenaho 1996) Koneen kuorman kasaaminen vaatii kuljettajalta huolellisuutta. Kuorma pidetään kasassa viimeisen taakan ja kuormaimen painon avulla. Täydellä kuormalla on ajouran tienvarteen oltava sivusuunnassa melko tasainen, sillä kuormaimen ”riiputtamista” tasapainon säilyttämiseksi ei voi käyttää kuorman purkautumisen vuoksi. (Pitkänen, suullinen tiedonanto 1997)

Tienvarsihaketuksen tuottavuus on suuri hyvillä varastopaikoilla, ja haketuksen ketjuttaminen on helpompaa kuin palstahaketuksessa. Polttoainetoimitukset onnistuvat melko tasaisesti metsästä käyttöpaikalle, sillä tienvarsivarastot toimivat puskurivarastona haketukselle. Valmiin hakkeen varastoiminen varmuusvarastoksi esim. konerikkojen varalta aiheuttaa kuitenkin lisäkustannuksia. Tienvarsihaketuksen ongelmana on mm. varastojärjestelyjen ja haketuksen vaatima tila sekä metsäautoteiden huono kunto. Toiminnan laajentuessa tienvarsihaketuksen organisointi vaatii työnjohdolta aikaa ja kehittyneet tiedonsiirtovälineet.

Tienvarsihaketuksessa ympäristöhaittoja aiheuttaa varaston sijainti ja haketus. Hakkuutähdevarasto on tehtävä aivan tien viereen, jotta hakkurin kuormain ylettyy syöttämään hakkuria. Tällöin varaston pohjalle jäävä hakkuutähde ja hienoaines jää tienviereen tai ojan pohjalle. Ojaan jäänyt neulasmassa saattaa tukkia oja. Haketusolosuhteet ovat usein heikot metsätien varrella; tie on kapea ja epätasainen, autoille on tilaa puutteellisesti ja kantavuus on heikko. Tällaisissa olosuhteissa työmaan siistiminen haketuksen jälkeen on vaikeaa, varsinkin jos työmaat ovat hajallaan toisistaan. Autoon haketuksen yksi ongelma onkin hakkeen pölyäminen ja roiskuminen kuormatilasta tielle ja lähiympäristöön.

Hyviä puolia ympäristön kannalta ovat siis:

- Tienvarsivarastot mahdollistavat osalla varastoista raaka-aineen lämpöarvon paranemisen varastoinnin aikana.
- Hakeraaka-aineen varastoiminen on mahdollista osalla työmaista.

Huonoja puolia ovat:

- Ojiin ja tielle jää haketta ja hakkuutähdettä.
- Häiritsee muuta liikennettä.
- Työturvallisuus: turvaetäisyyksiä on vaikea säilyttää riittävinä, jos muuta liikennettä kulkee aivan työmaan vierestä.
- Kaukokuljetus on usein tehotonta, sillä huonoilta metsäteiltä hakkeen kuljetus onnistuu vain nuppikuljetuksena tai vaihtolava-autolla. Kuljetuskalusto joutuu usein odottamaan haketuksen ajan kuorman täyttymistä.
- Hakkurikin joutuu välillä odottamaan kuljetuskalustoa, joten yksikkökustannukset nousevat.

3.2.3 Käyttöpaikalla murskaus

Hakkuutähde voidaan hakettaa tai murskata myös käyttöpaikalla. Tällöin hakkuutähteet kuljetetaan kokonaisina käyttöpaikalle, jossa haketus/murskaus

tapahtuu. Metsäkuljetus tapahtuu tällöin metsätraktorilla tai vastaavalla ja kaukokuljetus kuorma-autolla suoraan käyttöpaikalle. Hakkuutähteen kaukokuljetuksessa on samoja ongelmia kuin hakkuutähteen metsäkuljetuksessakin. Kuorman vähäisen tiiviyden vuoksi hakkuutähteitä ei kannata kuljettaa pitkiä matkoja. Käyttöpaikkahaketus tulee kyseeseen lähinnä alle 55 km:n kuljetusmatkoilla, kun kuormaa tiivistetään kuormaimella ja kuljetuskaluston tilavuus on maksimoitu. (Sauranen & Vesisenaho 1996)

Kaukokuljetuksen kannattavuuden parantamiseksi kuormatilaa olisi saatava tiivistettyä. Toinen ongelma on haketuksen ja varastokasojen vaatima tila käyttöpaikalla. Varsinkin pienillä lämpölaitoksilla tilanpuute estää tällaiset järjestelyt.

Irtonaisena hakkuutähteenä kaukokuljetus vaatii täysperävaunuautoon joka tapauksessa maksimaalisen kuormatilan. Tällöin ongelmaksi muodostuu yhdistelmän kulkukelpoisuus metsätieverkostolla. Maastokelpoisuus ja kääntyvyys ei ole tukkirekkaan verrattavissa, joten kyseisellä kalustolla toimiminen rajoittaa kerättävän hakkuutähteen määrää huomattavasti.

Suomessa on Pohjanmaalla käytössä hakkuutähteen paalausmenetelmä. Toimintaperiaatteena on kasoille hakatun hakkuutähteen paalaaminen noin kolmen metrin pituisiksi pötköiksi, jotka sitten kuljetetaan käyttöpaikalle murskattaviksi. Kyseinen toimintamalli ratkaisisi monta pulmaa. Hakkuutähdepaalien kuljetus onnistuisi metsästä lämpölaitokselle asti ainespuun kuljetukseen suunnitellulla kalustolla. Tienvarsivarastointikin onnistuisi ilman roskaantumisongelmaa. Kuljetuskalusto on jo olemassa, joten erikoiskoneiden määrä olisi melko pieni.

Käyttöpaikkamurskauksen etuja ympäristön kannalta:

- +/- Murskauksen pöly- melu- ja likaantumishaitat pienet, sillä toiminta tapahtuu teollisuusalueella.
- Raaka-aineen kuivattaminen on mahdollista käyttöpaikalla, jos siellä on riittävästi varastotilaa. Muussa tapauksessa raaka-ainetta on pyrittävä kuivaamaan tienvarsivarastolla.
- Murskaus on energiatehokasta käyttöpaikalla, murskauskapasiteettia on mahdollista hyödyntää tehokkaasti.

Negatiivia tekijöitä ympäristön kannalta:

- Tienvarteen välivaraston pohjalle jää aina hieman hakkuutähdettä, jos kuljetetaan ja kuormataan irtonaisia hakkuutähteitä.
- Käyttöpaikkamurskaus vaatii varastotilaa käyttöpaikalla, mikä aiheuttaa joskus ongelmia kaavoituksessa ja tilankäytössä olemassa olevilla laitoksilla.

- Hakkuutähteen hyötykuorma jää pienehköksi, joten energiaa tuhlaantuu kuljetukseen paljon.
- Hakkuutähteen paalaus vaatii koneen siirtoja ja on siksi pienillä työmailla tehoton.
- Toiminta vaatii aina suuren asiakkaan, jolla on mahdollisuus varastoida paaleja käyttöpaikalla varmuusvarastona sekä hakettaa/murskata paalit käyttöpaikalla.

3.2.4 Terminaalihaketus

Terminaalihaketusketjussa periaatteena on kerätä puupolttoainetta suuriin välivarastoihin eli terminaaleihin, joissa hakkeen raaka-aine kuivuu kesän yli. Polttoaineen tasainen jakelu onnistuu, sillä haketuksen tuottavuus on hyvällä varastopaikalla tienvarsivarastoja parempi ja valmista haketta on mahdollista toimittaa hakkeen todellisen kulutuksen mukaan. Mikäli varmuusvarastoja tarvitaan, on mahdollista hyödyntää kesän yli kuivanutta raaka-ainetta. Näin ollen vältytään valmiin hakkeen varastoinnin ongelmilta: hakkeen kuiva-ainehävikiltä ja kosteusongelmilta.

Hakkuutähteen kuljettaminen terminaaliin voi tapahtua periaatteessa kahdella eri menetelmällä. Metsäkuljetus toteutetaan tienvarteen tavanomaisella metsätraktorilla tai metsävarusteisella maataloustraktorilla ja kuljetus välivarastolle kuorma-autolla. Toinen vaihtoehto on yhdistää metsäkuljetus ja kuljetus välivarastolle. Tällöin käytetään traktorivetoista hakkuutähdeperävaunua, jolla hakkuutähde kerätään aukolta, kuljetetaan metsästä ja viedään kuorma jatkettuna lähikuljetuksena suoraan välivarastolle. Kannattavan toiminnan edellytyksenä on kuorman tiivistäminen, jotta kuorman koko saadaan riittävän isoksi.

Välivarastolla hakkuutähde kasataan isoihin aumoihin, joissa hakkuutähde saa kuivua kunnes hakkuutähde haketetaan. Suurissa välivarastokasoissa kuivuminen on tehokkainta kasan pintaosissa, pahimmillaan hakkuutähde ei kuivu kasan keskellä lainkaan. (Sauranen & Vesisenaho 1996), Toimittaessa suurilla varastoilla haketus kustannukset ovat pienemmät kuin tienvarsihaketuksessa, samoin vältetään muut tienvarsihaketuksen ongelmat. Haketus voidaan suorittaa noin yhden kuukauden kulutus kerrallaan, näin vältytään varastotappioilta ja saadaan haketusmäärät riittävän suuriksi kustannusten pienentämiseksi.

Varastokasojen peittäminen paperilla on Ruotsissa yleistä, ja Suomessakin osa alan toimijoista peittää merkittävän osan varastokasoistaan. Paperi suojaa kassaa kastumiselta joten peittämisellä saadaan hakkuutähdehakkeen toimitus-

kosteus pidettyä noin 10 %-yksikköä alempana. Peittäminen on sitä kannattavampaa mitä suurempi kasa on. (Sauranen & Vesisenaho 1996)

Ympäristövaikutusten kannalta terminaalihaketuksella on seuraavia etuja:

- Vältetään hakkuutähteen välivarastoinnilta tienvarteen.
- Hakkuutähteen kuljetus on mahdollista toteuttaa heti hakkuun jälkeen, jolloin maaston ja tiestön kantavuus on yhtä hyvä kuin ainespuun kuljetuksessa. Näin ollen vältetään esim. talvileimikoilla kantavuusongelmilta, jos hakkuu on lopputalvesta.
- Hakkuutähteen keruu on yhtä energiatehokasta pieniltä ja suurilta leimikoilta.
- Välivarastointi mahdollistaa hakkuutähteen kuivatuksen, näin ollen toiminnan hyötysuhde paranee. Lämpölaitokselle viedään pääasiassa kuivaa ja kevyttä haketta.
- Valmiin hakkeen kaukokuljetus on tehokasta.
- Haketus tapahtuu tehokkaasti.
- Pöly-, melu- ja likaantumishaitat pienet, sillä haketus tapahtuu tarkoituksen mukaisella alueella.

Huonoja puolia ovat:

- Terminaalivarastot vaativat tilaa. Kuntakohtaisesti käytössä on oltava 5–10 terminaalivarastoa, mikäli toiminta on systemaattista. Varastopaikkoja suunniteltaessa on huomioitava ympäristövaikutukset.

3.3 Hakkuutähteen kasaus hakkuukoneella

Hakkuutähteen tehokkaan talteenoton edellytyksenä on, että hakkuutähteet sijaitsevat kasamuodostelmissa ajouran vieressä. Tavanomaisessa hakkuussa hakkuutähteet jäävät pääosin hakkuukoneen ja kuormatraktorin ajouralle. Ajouralle jääneet hakkuutähteet sotkeutuvat niiden yli ajettaessa, niiden keruu vaikeutuu ja talteen saatava määrä vähenee. Ajourilta kerätyn tähteen joukkoon tulee helposti maata ja kiviäkin, jotka kuluttavat hakkurien teriä ja alentavat polttohakkeen laatua. Kun tarkoituksena on kerätä hakkuutähteet talteen, ne tulisi hakata helposti kerättäviin kasoihin ajouran viereen.

Suomessa käytetään yksinomaan yksiotehakkuukoneita. Yksiotehakkuukoneen tavanomainen työskentelytapa on yhdeltä puolelta hakkuu, jossa kone kaataa puut edestä ja toiselta sivulta noin 10 metrin leveydeltä ja karsii ja katkoo ne puutavaralajeiksi edessään. Tätä tekniikkaa soveltaen kasoihin hakkuu on totutteluvaiheen jälkeen keskimäärin yhtä nopeaa kuin tavanomainen hakkuu. (Elonen & Korpilahti 1996)

Kahdelta puolelta hakattaessa puut kaadetaan hakkuukoneen edestä ja molemmilta sivuilta. Näin hakataan puustoa leveämmältä alalta kuin yhdeltä puolelta hakattaessa. Menetelmä ei ole vakiintunut yleiseksi ja vaatii hakkuukoneen kuljettajalta totuttelua, jotta hakkuun tuottavuus ei kärsi. Käytettäessä kahdelta puolelta hakkuuta järeässä puustossa todettiin kasoille hakkuun olevan nopeampi kuin tavanomainen yhdeltä puolelta hakkuu. (Elonen & Korpilahti 1996) Metsäntutkimuslaitoksen tutkimuksessa kasoihin hakkuu kahdelta puolelta oli jopa 14 % tuottavampaa kuin yksipuoleiset hakkuumenetelmät. Tekniikka soveltuu huonosti, mikäli puutavaralajeja on paljon, sillä eri puutavaralajeille jää tilaa niukasti. Etuna kaksipuoleisella tekniikalla on siis tehokkuus hakkuussa ja normaalia harvempi ajouraverkosto, mikä nopeuttaa sekä puutavaran- että hakkuutähteen metsäkuljetusta.

Puun kaato ja siirto käsittelypaikkaan on kasoille hakattaessa pääosin hitaampaa kuin normaalissa hakkuussa, sillä rungon vienti kasan luo vie aikaa ja pidentää puomin vientimatkaa edelleen uuden puun tyvelle. Ison puun kaadossa puun kaatamista on seurattava hakkuulaitteella, jolloin runkoa voi siirrellä vasta puun kaaduttua maahan. Pieniä runkoja kaadettaessa puun tyveä voi siirtää kohti hakkuutähdekasaa jo puun kaatuessa. Leimikkotekijöistä johdettujen tutkimusten tuloksissa on suuri vaihtelu, mutta voidaan arvioida, että kasoihin hakkuu ei vaikuta tuottavuuteen heikentävästi (Elonen & Korpilahti 1996). Tuottavuuteen vaikuttavat kuljettajan tottuneisuus, hakkuukoneen ominaisuudet sekä leimikkotekijät; puuston koko, eri puutavaralajien määrä, aluskasvillisuus jne..

Ruotsalaisten kokemusten mukaan hakkuun hidastuminen hakkuutähteen keruun huomioimisen vuoksi on noin 2 % hyvin sisään ajetuilla menetelmillä. Skogforskin tutkimusten mukaan tuottavuus on tavanomaisissa hakkuissa n. 2–9 % parempi kuin kasoihin hakattaessa.

Hakkuukoneen normaali työtekniikka tähtää siihen, että oksat ja karsimattomat latvakappaleet kerääntyvät ajouralle maan ja pintajuurien suojaksi hakkuukoneen ja kuormatraktorin aiheuttamilta painumilta. Hakkuutähdematto on tärkeä suoja harvennushakkuilla, mutta sillä on merkitystä myös heikosti kantavilla uudistusaloilla. Kivisessä maastossa hakkuutähteellä voi hieman tasoittaa ajouran kivenkoloja ja muita epätasaisuuksia.

Vakiotekniikalla avohakkuuta hakattaessa oksat ja latvukset jäävät ajouralle matoksi. Tehtyjen tutkimusten mukaan (Nurmi 1994), vakiotekniikalla hakattuna noin neljännes tähteestä jää paksuudeltaan yli 50 cm:n muodostelmiin. Hakkuukoneen ja kuormatraktorin ajettua moneen kertaan ajouralla, latvussmassa tiivistyy yhtenäiseksi kerrokseksi varsinkin renkaiden uralla. Nurmen tutkimuksen mukaan 80 % hakkuutähteestä tiivistyy pyörien alla. Tiivistymi-

sestä huolimatta hakkuutähdepatja on melko paksu. Tiivistyneenä myös alle 50 cm:n korkuinen hakkuutähdekasa heikentää maanmuokkauksen tulosta. Käytännössä kuusikon avohakkuilla ajoura on lähes yhtenäisen hakkuutähdepatjan peitossa. Katso kuva 5 (s. 20).



Kuva 5: Hakkuutähteiden kasaamisen tekniikat motolla puita kaadettaessa. (Hakkila ym. 1998)

4 Hakkuutähteen korjuun ympäristövaikutukset

4.1 Metsätaloutteen liittyvät vaikutukset

4.1.1 Maanmuokkauksen helpottuminen

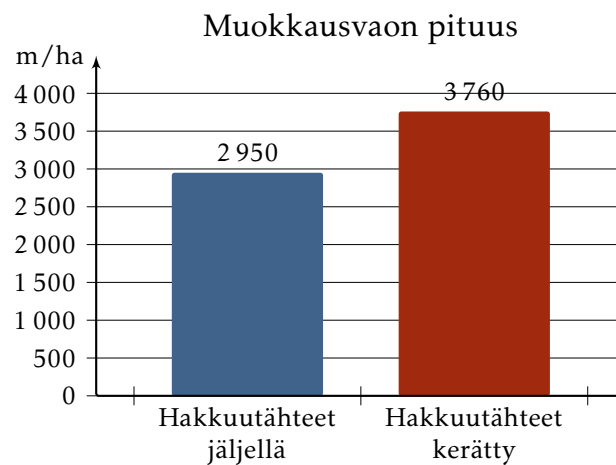
Hakkuutähteiden keräämisen jälkeen maanmuokkaus onnistuu tehokkaammin ja tuloksena on enemmän hyviä istutuspaikkoja ja luontaisten taimien itämissaikoja. Hakkuutähteiden korjuun seurauksena äestysjälki on määrällisesti ja laadullisesti parempi (kuva 6 s. 21). Tähteiden poisto keventää istutustyötä, helpottaa istutuspaikkojen löytämistä ja vähentää istutusvirheitä. Kun paksut ja tiivistyneet hakkuutähdekaset puuttuvat, on mahdollista istuttaa tarvittava taimimäärä tasaisesti koko pinta-alalle. Lopulta syntynyt taimikko on tiheämpi ja parempilaatuinen kuin perinteisellä toiminnalla saatu taimikko.

Kun oksakasa on maaton, siihen itävät taimet ovat auttamatta myöhässä taimikon täydennykseksi. Ongelma oli aikoinaan pienempi kun hakkutyö toteutettiin metsurityönä. Tällöin oksat levisivät tasaisemmin hakkuualalle. Moto-

hakkuiden yleistymisen myötä oksakasat tulivat ongelmaksi 70-luvulta lähtien. Nykyisissä 20–30-vuotiaissa nuorissa metsissä on nähtävissä epätasaisen taimikoiden vaikutus puuston kehitykseen. Tosin erityisesti nuorten männiköiden ulkonäköön vaikuttaa suuresti myös männyille liian rehevät maapohjat sekä käytettyjen taimien huono laatu.

Maanmuokkaus voidaan suorittaa kevyemmällä paineella, kun työtä vaikeuttava hakkuutähdekerros puuttuu. Tällöin pintamaasta nousee vähemmän kiviä ja muokkausjälki paranee. (Hakkila, suullinen tiedonanto) Erittäin rehevillä metsämailla on usein käytäntönä odottaa 1–3 vuotta hakkuun jälkeen hakkuutähteiden kuivumista ja maatumista, ennen kuin maa muokataan. Tällaisilla kohteilla on myös kulutus mahdollista. Tällöin menetetään vastaavan ajan kasvu ja pintakasvillisuus ehtii kehittyä täyteen mittaansa.

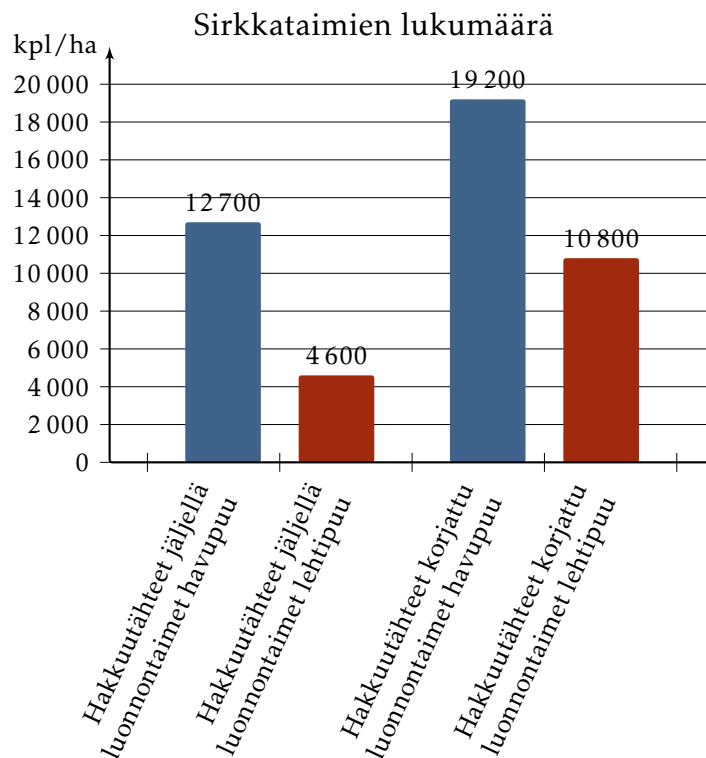
Hakkuutähteiden keruu mahdollistaa paikoin koneellisen kylvön, eli kylväminen tapahtuu samanaikaisesti maanmuokkauksen kanssa. Näin toimittaessa kylvön työnlaatu ja hinta on selvästi kilpailukykyisin uudistamismuoto menetelmälle soveltuvilla maapohjilla.



Kuva 6: Hakkuutähteiden korjuun vaikutus äestysjälkeen. (Koskenranta & Reiman 1997)

4.1.2 Uudistumisen parempi onnistuminen

Maanmuokkauksen onnistuminen vaikuttaa suoraan sekä metsänviljelyn että luontaisen uudistumisen onnistumiseen (kuva 7 s. 22). Mitä enemmän kivennäismaata saadaan näkyviin sitä enemmän löytyy hyviä istutuspaikkoja. Luonnontaimien itäminen ja alkukehitys onnistuu parhaiten kivennäismaalla.



Kuva 7: Hakuutähteiden poiston vaikutus muokkausvuonna syntyneiden sirkkataimien määrään. (Ahokas ym. 1997)

Viljelyalalle kehittyvä pintakasvillisuus määrää istutettavien taimien vähimmäiskoon siten, että periaatteessa kaikkien taimien tulee olla pitempiä kuin vallitseva pintakasvillisuus on rehevimmillään. Mitä viljavampi kasvupaikka, sitä kookkaampia taimia tulisi käyttää. Järeällä maanmuokkauksella, esim. mätästyksellä voidaan korvata taimen koon kasvattamista. Toisaalta syksyllä kuloutuvan pintakasvillisuuden kuormaa kestääkseen taimien tulisi olla pieniä mutta tanakoita, eli niillä tulisi olla suuri juuri/verso-suhde. Rehevillä mailla käytetään usein joko kookkaita koivun taimia tai avojuurisia kuusen taimia. Paljasjuuriset taimet ovat menestyneet paakutaimia paremmin nimenomaan runsaasti heinittyvillä alueilla. (Siipilehto 1995) Rehevillä maille perinteisesti taimien henkiinjäämistä parannetaan maanmuokkauksella, eli äestyksen sijaan mätätetään hakkuualue, tai istutustaimien kookoa kasvattamalla. Molemmat menetelmät lisäävät osaltaan uudistamiskustannuksia.

Pintakasvillisuuden kilpailua erityisesti ravinteista ja vedestä pidetään valokilpailua tärkeämpänä tekijänä puun taimien menestymiseen. Rikkakasvien

maanalainen biomassa voi olla huomattavasti suurempi kuin maanpäällinen. Ellei taimi ole aivan kasvillisuuden peitossa, auringonvalo ei yleensä rajoita taimen kasvua. (Siipilehto 1995) Tuoreessa tutkimuksessa havaittiin avohakkuualoilla, joissa hakkuutähteet oli jätetty metsään, heinän olevan suurikasvuisempaa ja heinän määrän vaihtelevan enemmän kuin korjatuilla aloilla. Heinä oli keskimäärin 26 % painavampaa aloilla, joissa hakkuutähteet jätettiin maastoon, tosin heinän määrässä oli runsaasti hajontaa.

Miestyönä tehtävässä istutuksessa hakkuutähteet lisäävät työvaikeutta ja vaikuttavat välillisesti istutustaksaan. Hakkuutähteiden poisto sopivan istutuspaikan päältä on ylimääräinen työvaihe, joka on hinnoiteltava istutustyöhön. Istutustyön urakaluonteisuuden vuoksi istuttajat valitsevat usein mieluummin seuraavan risuista vapaan paikan. Tämän seurauksena havukat aiheuttavat puurykelmiä ja aukkoja taimikkoon. (Koskenranta & Reiman 1997) Tutkimuksen mukaan istutusvirheet vähenivät huomattavasti hakkuutähteen korjuun vaikutuksesta. Viljely oli onnistunut tasaisemmin korjatuilla alueilla ja taimia oli lukumääräisesti 8 % enemmän kuin korjaamattomilla alueilla.

Havukasan vieressä olevat taimet ovat vaarassa tuhoutua, kun hakkuutähdekasasta liukenevat ravinteet auttavat horsman ja vadelman kasvua hakkuuta seuraavina vuosina juuri hakkuutähdekasan läheisyydessä.

4.1.3 Hakkuutähteen poiston vaikutus taimikon kasvuun

Laadun kannalta puuston kehityksen 5–6 ensimmäistä metriä ovat tärkeimmät. Sahapuun korkean laadun takaamiseksi nykyisissä metsänhoito-ohjeissa taimikoita suositellaan kasvatettavaksi alkuvaiheessa riittävän tiheinä. Tähän maanmuokkauksen ansioista luontaisesti syntyvä taimiaines antaakin hyvät mahdollisuudet. Luonnontaimien itäminen onnistuu käytännössä parhaiten muokatulla maapohjalla, siksi hakkuutähdepatjan kohdalle ei tule myöskään luonnontaimia. Seurauksena on epätasainen taimikko, jonka harvennuksessa ja ensiharvennuksessa on oltava erittäin huolellinen. Taimikon kasvatuksen tavoitteena on kasvattaa puusto ensiharvennuksen siten, että kaikki ensiharvennuksen säilyvät puut täyttävät ainespuumitat ja hyvälaatuisia puita on riittävästi tuleviin päätehakkuisiin kasvatettavaksi. Taimikolle on tehtävä vähintään yksi harvennus, jolloin harvennetaan jäävä puusto noin 2 000 taimen hehtaari tiheyteen. Riittävän voimakas taimikon harvennus mahdollistaa aikanaan taloudellisesti kannattavan ensiharvennuksen.

Istuttamisen jälkeen kuusen taimien alkukehitys on yleensä hidasta. Tällainen juromisaika on yleensä 3–6 vuotta. Varsinkin rehevillä mailla pintakasvillisuus helposti voittaa hitaasti nousevat taimet ja haittaavat taimien elpymistä. Alavilla mailla on lisäksi hallan vaara.

Hakkuutähteiden vaikutus taimien alkukehitykseen ja hengissä säilymiseen on pieni. Toisaalta pienetkin erot taimien kasvussa vaikuttavat taimien kilpailukykyyn vesakkoa ja pintakasvillisuutta vastaan. Hyvin kasvuun lähteneet taimet menestyvät myös myöhemmin hyvin (Lundborg 1990). Ruotsalaisten tutkimusten perusteella voidaan yleistää, että männyn istutustulokset paranevat ja kuusen vastaavasti huonontuvat hieman hakkuutähteiden poiston vaikutuksesta (Tennberg 1996).

Ruotsalaisten tutkimusten mukaan hakkuutähteiden poisto on lievästi parantanut taimien eloonjäämistä. Hakkuutähteiden poiston todettiin kotimaisessa tutkimuksessa hidastavan hieman kuusentaimien pituuskasvua alkuvaiheessa. (Koskenranta & Reiman 1997) Rinteessä hakkuutähteiden poistaminen lisäsi taimien pituuskasvua jonkin verran, kun taas alempana sijainneilla alueilla hidasti. Kasvupaikat ovat olleet osittain hallanarkoja ja siksi kuuselle epäsuotuiset. Hallavuosia oli jatkuvasti tutkimusaikana. (Leikola & Raivonen 1980)

Hakkuutähteet tasaavat mikroilmaston vaihtelua; päivällä on viileämpää, yöllä lämpimämpää. Myös maan kosteus on hakkuutähteen alla koko kesän korkeampi ja vaihtelee vähemmän kuin hakkuutähteettömällä alueilla. Kylmillä ja kosteilla kasvupaikoilla maan kosteus voi muodostua kuusen taimille haitallisen suureksi hakkuutähdekasojen alla. Vastaavasti poikkeuksellisen kuivillakaan alueilla hakkuutähteen poistamisella ei havaittu haittavaikutuksia. (Leikola & Raivonen 1980)

Taimien menestymiseen istutuksen jälkeen vaikuttavat monet yksittäiset ja toisistaan riippumattomat tekijät, joten hakkuutähteiden osittaisen poistamisen vaikutusta on vaikea erottaa. Hakkuutähteen poisto voi joko lievästi parantaa tai heikentää taimien alkukehitystä, vaikutus ei ole kovinkaan merkittävä. On huomattava, että vaikutuksia kasvuun on tutkittu poistamalla kaikki hakkuutähteet koaloilta. Käytännössä hakkuutähteen täydellinen korjuu ei ole taloudellisestikaan järkevää.

4.1.4 Metsänterveys

Luonnon sukkessiossa elävän puuston läheisyydessä ei ole juuri koskaan tuoretta puutavaraa ja hakkuutähdettä huomattavia määriä. Luonnon kiertokulussa kuusikot uudistuvat normaalisti metsäpalon seurauksena. Tällöin suuri osa puutavarasta palaa, kun metsäpalo etenee latvapalona. Ilman metsäpaloa uudistuminen tapahtuu kaatuvien puiden tilalle syntyvien pienten aukkojen taimettumisen myötä. Avohakkuun seurauksena hakkuualalle jäävä havumatto on siis poikkeuksellisen hyvä lisääntymispaikka monille hyönteisille.

Metsätaloutemme ehkä merkittävimmät tuhoeläinongelmat, nimittäin kaarnakuoriaisten kasvavalle puustolle aiheuttamat vahingot, tukkimiehentäin tuhot metsänviljelyaloilla ja puutavaratuholaisten lisääntyminen ovat seurauksena juuri hakkuutähteen, tuoreen puutavaran ja elävän puuston läheisyydestä. Muutokset puutavaravarastojen ja hakkuutähteen tarjoaman lisääntymismateriaalin määrässä vaikuttavat olennaisesti tuohyönteiskantoihin. (Hakkila 1974, Nuortema 1968)

Hakkuutähteissä voivat lisääntyä lähes kaikki havupuilla elävät kaarnakuoriaiset, useimmat sarvijäärät, muutamat kärsäkkäät ja lisäksi eräät muihin heimoihin kuuluvat hyönteiset. (Hakkila 1974, Saalas 1949) Männyn tukkien tyveykset ja muut vastaavat järeät runkopuun kappaleet ovat hakkuutähteistä ehkä soveltuvimpia pystynävertäjän ja eräiden muiden kaarnakuoriaisten lisääntymismateriaaliksi (Nuortema 1968). Kuusen rungon kappaleissa esiintyy kirjanpainajia (*Ips* spp.) (Hakkila 1974). Kuitenkin tällaisia rungonosia jää metsiin tuohyönteisten kannalta merkityksettömän vähän. Uusien metsänhoitosuosituksen mukaan järeää runkopuuta vastaavaa puutavaraa pitäisi jättää metsiin lahoppuiksi vähintään 5 m³/ha, jotta järeästä lahoppuusta riippuvaiset vanhojen metsien lajit eivät vaarantuisi.

Hakkuutähteen talteenotto vähentää myös peto- ja loishyönteisiä ja myös hyödyllisinä pidettäviä hyönteisiä. Käytännössä vaikutus on kuitenkin merkityksettömän pieni. (Hakkila 1974)

Seuraavassa on esitelty lyhyesti lajeja ja metsätuhoja, joihin hakkuutähteen poistolla on merkitystä.

Kuusen tähtikirjaaja (*Pityogenes chalcographus*) on erittäin yleinen hakkuun jälkeen metsään jääneissä oksissa ja latvuksissa. Toukkia ja kotelaita esiintyy kuoren alla elokuun loppuun, sen jälkeen löytyy pääasiassa aikuisia kuoriaisia. Tähtikirjaajat parveilevat alkukesällä, jolloin ne iskeytyvät nuoriin kuusiin. Tähtikirjaajat kuivattavat pystyyn nuoria kuusia. Usein puun tyviosia säilyy hengissä vielä vuosia latvan kuivamisen jälkeen. (Jukka 1988) Hakkuutähteen poisto vähentää tähtikirjaajien lisääntymismahdollisuuksia. Poistamalla hakkuutähteet ennen seuraavaa kesää, voidaan tähtikirjaajakantoja vähentää paikallisesti.

Suutari (*Monochamus sutor*) on 18–35 mm:n pituinen musta sarvijäärä, joka elää sekä kuusella että männyllä. Suutarit munivat heinä- elokuussa aurinkoisilla paikoilla hakkuun jälkeen jääneisiin tuoreisiin latvuksiin ja tukkeihin. Noin kuuden viikon ikäisinä toukat porautuvat syvälle puuhun, missä ne talvehtivat. Suutarin sukupolviaika saattaa olla useita vuosia. (Jukka 1988) Suutarin paikallinen lisääntyminen pysyy kurissa poistamalla hakkuutähteet aurinkoisilta aukoilta ennen seuraavaa kesää. Hakkuualalle hakkuutähteen

keräämisen jälkeen jäävät rungonosat ja latvukset ovat määrältään niin vähäisiä, että metsänterveysriskiä ei enää ole.

Okakaarnakuoriainen (*Ips acuminatus*) on kaarnakuoriainen, joka aiheuttaa vahinkoa sinistämällä puutavaraa. Laji esiintyy runsaana eteläisintä Suomea lukuun ottamatta. Okakaarnakuoriainen elää hakkuutähteissä oksien ja latvusten ohuen kuoren alla sekä tuulenkaadoissa ja heikentyneissä pystypuissa. Laji parveilee touko–kesäkuussa, kun ilman lämpötila saavuttaa +18 astetta. (Jukka 1988)

Männylle tarpeeton viljavuus lisää sekä versoruosteen että karistetautien esiintymistä (Kurkela 1994). Männylle uudistamista voi suositellakin vain puolukkatyypin ja sitä karummille maille. Mäntyä syntyy jonkin verran luontaisesti sekapuustoksi myös rehevämällä mailla, pääasiassa mustikkatyypin kangasmailla. Periaatteessa hakkuualalle jäävä hakkuutähdemassa rehevöittää pintakasvillisuutta ja siten lisää versoruosteen ja karistetautien esiintymisriskiä. Käytännössä rehevöitymisvaikutus on pienehkö. Hakkuutähteen pintamaata rehevöittävä vaikutus joka tapauksessa vähenee, kun alueelta kerätään suurin osa hakkuutähteestä pois.

Männynthalvihome (*lumikariste*) leviää nopeimmin, jos aluskasvillisuus puuttuu. Mitä nopeammin taimet kasvavat lumen pinnan yläpuolelle, sitä varmemmin ne säilyvät hengissä, vaikka tauti tappaisikin alaoksat. (Kurkela 1994) Hakkuutähteen keruu helpottaa osaltaan taimikon nopeaa kasvamista, kun maa sulaa nopeammin keväällä. Hakkuutähteen keruun on todettu vaikuttavan positiivisesti männyn taimikoiden kasvuun (Sinclair ym. 1992, Tennberg 1996). Runsas luontainen taimiaines hakkuutähteen keruun jälkeen korvaa kuolevat männyn taimet.

Yleistäen voidaan todeta, että hyönteisten ja jyräjien tuhot vähenevät hakkuutähteen korjuun vaikutuksesta (Koskenranta & Reiman 1997). Lumikaristeaurioita lukuun ottamatta sienituhoihin hakkuutähteen korjuulla ei ole todettu vaikutusta. Myös myyrätuhoja on vähemmän alueilla, missä hakkuutähteet on kerätty pois. (Björkroth 1984).

4.2 Vaikutukset metsämaan ravinnetalouteen

4.2.1 Maaperän sisältämät ravinteet

Boreaalisen havumetsävyöhykkeen metsät ovat sopeutuneet äärimmäisen vaihteleviin olosuhteisiin: vuodenaikojen vaihtelu, metsäpalot, tuulet jne.. Luonnontilaisen metsikön ravinnevarat ovat pitkällä aikavälillä melko muuttumattomat. Pääosa ravinteista on tiukasti kiinni ekosysteemin sisäisessä bio-

logisessa ravinnekierrossa ja vain pieni osa ravinteista poistuu ekosysteemisistä huuhtoutumisen seurauksena ja metsäpalojen yhteydessä. Ilmakehästä tulevat laskeumat ja maa-aineksen kivennäisaineiden rapautuminen korvaavat ekosysteemistä poistuneita ravinteita. Biologisen ravinnekierroksen edellytyksenä on mm. orgaanisen aineen kulkeutuminen maaperään, sopivat vesi-, happamuus- ja lämpöolot sekä elinvoimainen maamikrobisto. (Hakkila & Fredriksson 1996)

Oksat ja latvukset lehtineen sisältävät noin kolmanneksen puuston maanpäällisen osan biomassasta. Puiden sisältämistä ravinteista oksissa ja latvuksissa on kuitenkin noin kaksi kolmasosaa. Suhteet vaihtelevat tietenkin puulajin, puun koon ja ravinteen mukaan. Esimerkiksi kuusikossa sitoutuu hakkuutähteisiin paljon enemmän ravinteita kuin koivikossa. (Hakkila & Fredriksson 1996)

Hakkuutähteistä vapautuu uudistusosalalle ravinteita yli kymmenen vuotta hakkuun jälkeen. Erityisesti neulasets sisältävät paljon ravinteita (typpi, fosfori, kalium, kalsium). Lehdissä ja neulasissa olevat ravinteet vapautuvat melko pian ja osa niistä huuhtoutuu uudistusosalalta. Pioneerikasvit, kuten erilaiset heinät, valtaavat uudistusalan nopeasti ja sitovat osan vapautuneista ravinteista. Ravinteet ovat myöhemmin puiden käytettävissä kenttä- ja pensaskeroksen maatuessa. Alkuvaiheessa puiden taimet eivät kuitenkaan käytä etenkin viljavilla mailla uudistusalan ravinnetarjontaa täysimääräisesti hyväkseen, vaan kilpaileva kasvusto hyötyy runsaista ravinteista. Osa uudistusalan ravinteista pääsee huuhtoutumaan pintavesien mukana. Luontaisessa metsän kehityskulussa metsäpalo vapauttaa ravinteet kiertoon. Metsäpalossa osa ravinteista haihtuu kuumuuden vaikutuksesta ja poistuu näin kierrosta. Näin tapahtuu esimerkiksi suurelle osalle puuhun sitoutuneesta typestä. (Paananen, Haimi, suullinen tiedonanto 1997)

Kokonaisravinnetarjonta on metsässä suhteellisen suuri verrattuna puiden ravinnetarpeeseen. Kuitenkin vain pieni osa ravinteista on puille käyttökelpoisessa muodossa. Eteläsuomalaisessa metsämaassa typpi on useimmiten kasvun minimitekijä. Typen määrää mittaamalla ei kuitenkaan voi luotettavasti päätellä maaperän rehevyyttä, sillä vain n. 1 % maaperän kokonaistyyppivarastosta on puille käyttökelpoisessa muodossa. (Hakkila & Fredriksson 1996)

Suomailla puolestaan on runsaasti mm. orgaanista ainetta ja tyyppiä, mutta niukasti kivennäisravinteita. Kivennäismaan tapaan paksuturpeisten soiden kaliumvarat eivät täydenny kivennäismaan rapautumisen kautta. Suomailla kokopuun korjuu poistaisikin vaarallisen paljon tärkeitä ravinteita. (Hakkila & Fredriksson 1996)

Orgaanisen aineksen hajoaminen hakkuun jälkeen tapahtuu nopeimmin neu-

lasissa ja lehdissä. Typpi ja fosfori mineralisoituvat alussa hitaasti, kun taas kalium ja magnesium vapautuvat nopeasti. Typen vapautuminen neulasista on suurimmillaan 3–6 vuoden kuluttua, jonka jälkeen se lähes loppuu 10 vuoden kuluessa. Sen sijaan typen vapautuminen oksien puuaineesta tapahtuu vasta lähes 10 vuoden kuluttua hakkuusta. Ne muodostavat hitaasti hajoavan, mutta pitkäjaksoisen ravinnelähteen taimikoille. (Staaf 1984) On arvioitu, että kerättävien hakkuutähteiden määrä vastaa päätehakkuissa noin 10–15 vuoden karikesatoa. Kotimaisten tutkimusten mukaan kertaluonteinen hakkuutähteiden keräys ei olennaisesti vähennä maan orgaanisen aineksen määrää verrattuna perinteisiin hakkuutapoihin. (Kukkola & Mälkönen 1996)

Hakkuutähteiden keruu kohdistuu jo taloudellisista syistä kuusivaltaisiin päätehakkuukohteisiin. Tällöinkin epäpuhtauksien välttämiseksi ja kannattavuuden säilyttämiseksi hakkuutähteistä korjataan korkeintaan 75 %. Kohdevalinnalla ja jättämällä osa hakkuutähteistä uudistusosalalle pyritään välttämään liiallinen ravinteiden vienti uudistusosalalta (Brunberg ym. 1994). Toisaalta hakkuutähteissä korjattavat kivennäisravinteet voitaneen palauttaa tuhkalannoituksen muodossa metsäekosysteemiin, mikäli tarvetta ilmenee.

4.2.2 Hakkuutähteen keruun vaikutukset metsämaan ravinnevaroihin ja ravinteiden käyttöön

Keskiravinteikkailla ja ravinteikkailla mailla hakkuutähteiden korjuulla ei ole pysyvää haitallista vaikutusta maan ravinnetasapainoon. Kuivilla ja karuilla mailla hakkuutähteen korjuu saattaa köyhdyttää maaperää liikaa. Myös suurin osa turvemaista on liian ravinneköyhiä hakkuutähteen keruun kohteeksi. (Koskenranta & Reiman 1997) Pohjoiseen siirryttäessä hakkuutähteiden ravinnesisällön merkitys maan kasvukyvyn ylläpitäjänä kasvaa.

Hakkuutähteen korjuussa poistuu ravinnekierrosta orgaanista ainetta, jonka hajottamisessa normaalisti vapautuu happamoitumista tasapainottavia emäsravinteita.

Toisaalta kuusikossa varjoisaan pintamaahan kertyy neulasmassaa, sillä kylmissä ja varjoisissa oloissa maaeliöstön hajotustoiminta on hidasta. Hakkuun jälkeen neulasmassan ja muun karikkeen hajotustoiminta taas nopeutuu ja ravinteita vapautuu.

Metsänuudistamisen nyrkkisääntönä on ollutkin, että paksukunttaiseen kuusikkoon kannattaa istuttaa koivua, jotta maaperän ravinnetilanne ehtii elpyä kuusikkovaiheen jälkeen.

Hakkuualalle jäänyt hakkuutähte yhdessä pintakasvillisuuden ja humuksen kanssa vaikuttaa pintamaan vesi- ja ravinnevarastoon (Lundborg 1990). Maa-

tuva kasvillisuus ja hidas rapautuminen täydentävät koko ajan kasvillisuuden käytössä olevia ravinnevaroja. Ravinnetasapaino muuttuu metsämaassa koko ajan: Ravinteet liikkuvat hitaasti veden ja reagoivien aineiden mukana. Kasveille käyttökelpoisessa muodossa on vain osa maaperän kokonaisravinnemäärästä.

Hakkuutähteiden poistaminen voi heikentää seuraavan puusukupolven kasvua, sillä ravinteet ja orgaaninen aines vähenee pintamaassa. Pintamaan orgaanisen aineksen vähenemistä kompensoi tehokkaasti puiden juuriston lahoaminen. Uudistushakkuulla kaadettujen puiden juuristo muodostaa koko hakkuualan kattavan lahoppureservin, joka maatuessaan lannoittaa metsämaata useita vuosia hakkuun jälkeen. Ensimmäisenä maatuu hiusjuuristo heti hakkuun jälkeisenä kesäkautena, vastaavasti järeämpi juuristo maatuu hitaasti usean vuoden aikana hakkuun jälkeen. (Haimi 1997, Lundgren 1982 & Entry ym. 1986) Ravinteiden menetys on tilapäinen sikäli, että hakkuualalle kasvava kasvillisuus ja puuston lehdet alkavat maatua nopeasti samalla kun reunametsän lehdet ja neulas- ja neulas- ja lehtimassalla sekä lahoavalla puuaineksella. USA:ssa tehdyissä kokeissa todettiin, että lehtimet-sikön karikke- ja humuskerros ei vähene, mikäli puuston kiertoaika on 60–90 vuotta. Mikäli kiertoaikaa lyhennetään, voi orgaanisen aineksen määrä vähentyä ja maaperä köyhtyä. Pohjoismaisia pitkäaikaisia tutkimuksia aiheesta ei ole. (Lundborg 1990)

Karikke on raaka-ainetta humuksen muodostumiseen. Mikro-organismit hajottavat kariketta saadakseen energiaa ja ravintoa. Tällöin kasvien tarvitsemia ravinteita mineralisoituu. Mikäli karikkeen määrä vähenee runsaasti, vähenee myös mineralisoitujen ravinteiden määrä. Humuksen hyvä kunto on tärkeää erityisesti karkeilla maalajeilla, sillä se sitoo vettä ja ravinteita. Humus myös suojaa pintamaata lämpötilan vaihteluilta ja jäätymiseltä. (Lundborg 1990)

Karikkeen hajoamiseen vaikuttaa sen ligniinipitoisuus. Korkea ligniinipitoisuus hidastaa hajoamista ja johtaa humuskerroksen haitalliseen paksuuntumiseen. Typpi häiritsee ligniinin hajotusta. Häiritsevä vaikutus on seurausta joko hajottavien entsyymien häiriintymisestä tai erikoisen vaikeasti hajoavien aineiden muodostumisesta. (Lundborg 1990) Näin ollen hakkuutähteistä liukeneva typpikuormitus voi haitata karikkeen hajotustoimintaa ja siten käytettävissä olevien ravinteiden määrä voi vähentyä karikkeessa ja pintamaassa.

Hakkuutähteen keruun jälkeen maanpinnan lämpötila on kasvukaudella korkeampi kuin vastaavalla hakkuutähteiden peittämällä alalla. Tällöin maaperän eliöstön hajotustoiminta on vilkkaampaa ja kestää ajallisesti kauemmin. Pahimmillaan maa on jäässä hakkuutähdekasojen alla selvästi kesäkuun puo-

lelle asti. Nopeutunut hajotustoiminta hakkuutähteettömällä hakkuualalla tuottaa ravinteita kasvillisuuden käyttöön, näin ollen potentiaalisen kokonaisravinnemäärän väheneminen ei yksiselitteisesti vähennä kasvien käytettävissä olevien ravinteiden määrää.

Maaperän käytettävissä olevat ravinnevarat, kationit, vähenevät happaman laskeuman ja metsän intensiivisen talouskäytön seurauksena. Tehokas biomassan poistaminen metsästä aiheuttaa lisävajausta ravinnetasapainossa (Lundborg 1990). Suomessa maaperä on yleisesti melko hitaasti rapautuvaa maalajia, kasvukausi on lyhyt ja humus karuilla kasvupaikoilla ohut. Kuitenkin maaperässä on moninkertaisesti kasvien tarvitsemat määrät tärkeimpiä ravinteita.

Normaalisti avohakkuun seurauksena pohjaveden pinta nousee ja pintavalunta lisääntyy, kun kookkaan puuston vedenkulutus yhtäkkiä loppuu. Kuusivaltaisilla hakkuuaukoilla ei ole vielä hakkuuta seuraavina vuosina kasvillisuutta kuin laikuittain, sillä hakkuutähteet peittävät suuren osan maa-alasta. Jäljelle jääneet hakkuutähteet lisäävät ravinteiden huuhtoutumista, sillä niistä liukenee hakkuuta seuraavien vuosien aikana runsaasti typpeä kasan alle maaperään. Osaltaan hakkuutähteet estävät ravinteita sitovan pintakasvillisuuden kasvamista. Erityisesti kuusivaltaisilla rehevillä avohakkuualoilla pintakerroksen vapaan tilan valtaavat erilaiset heinät, jotka vaimentavat pintavaluntaa tehokkaasti.

Perinteinen metsätalous ei juuri vaikuta metsän ravinnetasapainoon mahdollista kalsiumtasapainoa lukuun ottamatta. Jos metsästä viedään runkopuun lisäksi myös hakkuutähteet, mineraalikato yli kaksinkertaistuu ja metsästä viedään myös suuri määrä typpeä pois. Hävikkiä tapahtuu myös lisääntyneen huuhtoutumisen myötä. (Wihersaari 1996) Yhteenveto puuston metsän pohjan ja maaperän sisältämistä ravinnemääristä on taulukossa 1 (s. 30).

Taulukko 1: Puuston, metsän pohjan ja maaperän sisältämät ravinnemäärät.

Osite (kg/ha)	Typpi N	Fosfori P	Kalium K	Kalsium Ca
Puut	430	40	200	510
Metsän pohja	1 100	60	80	260
Maaperä	3 100	3 600	64 000	40 000

Typpi

Typpi on ravinneaineista tavallisesti puun kasvun minimitekijä. Määrällisesti metsämaassa on runsaasti typpeä, mutta valtaosa tästä on kuitenkin hu-

mukseen sitoutuneina suhteellisen pysyvinä yhdisteinä. Liika typpi lisää happamoitumista ja huuhtoutumavaaraa vesistöön. Ilmansaasteiden kautta tulee metsään nykyään typen nettolisäystä, minkä vuoksi esim. Etelä- Ruotsissa on järkevää vähentää metsän typpikuormaa ottamalla hakkuutähteet talteen. (Wihersaari 1996)

Hakkuutähteitten alta maaperästä on mitattu korkeita nitraattipitoisuuksia (Tennberg 1996). Kotimaisten kokemusten mukaan nitraattipitoisuus on korkealla varsinkin hakkuutähdekasojen alla. Nitrifikaation myötä hyödyllinen ammonium-typpeä muuttuu nitraateiksi. Nitraatit ovat haitallisia, sillä ne liukenevat pintaveden mukana ja ne happamoittavat maata kasan alla. (Haimi 1997) Juuri hakkuutähdekasojen huuhtoutuu runsaasti typpeä ja muita ravinteita maaperään.

Huuhtoutumisen lannoitusvaikutus on kuitenkin huono, sillä ravinteet eivät juurikaan liiku maaperässä vaakatasossa, vaan jäävät hakkuutähdekasojen ympärille. Seurauksena on typen ylitarjonta, jota useimmat kasvit eivät pysty hyödyntämään. (Hakkila 1997, suullinen tiedonanto) Tällöin typpeä hyödyntävät kasvit kuten maitohorsma ja vadelma valtaavat hakkuualueen estäen tehokkaasti normaalin pintakasvillisuuden lisääntymisen ja puiden luontaisen uudistumisen. Korkea maitohorsman ja vadelman muodostama kasvillisuus tukahduttaa usein myös istutetut taimet, sillä talvella korret kaatuvat lumen alle kaataen samalla heiveröisen puuntaimenkin.

Nykyisiä metsiä vaivaa yleisesti typen puute, ja suuressa osassa Suomea metsäkasvillisuus pystyy käyttämään typpilaskeumaa lannoitteena. Lisääntymässä oleva typpilaskeuma voi joillakin alueilla kuitenkin ajan mittaan johtaa ekosysteemin kyllästymiseen typellä, jolloin typpilaskeuma ei enää pidä täysimääräisesti maaperän typen kiertoa. Kyllästymispisteen saavuttamisen jälkeen kasvien ravinteiden otto on ainoa typen pidättymismekanismi. Typen huuhtoutumisen selvää lisääntymistä on havaittu eräillä luonnontilaisilla metsävaluma-alueilla Etelä-Suomessa. (Wihersaari 1996)

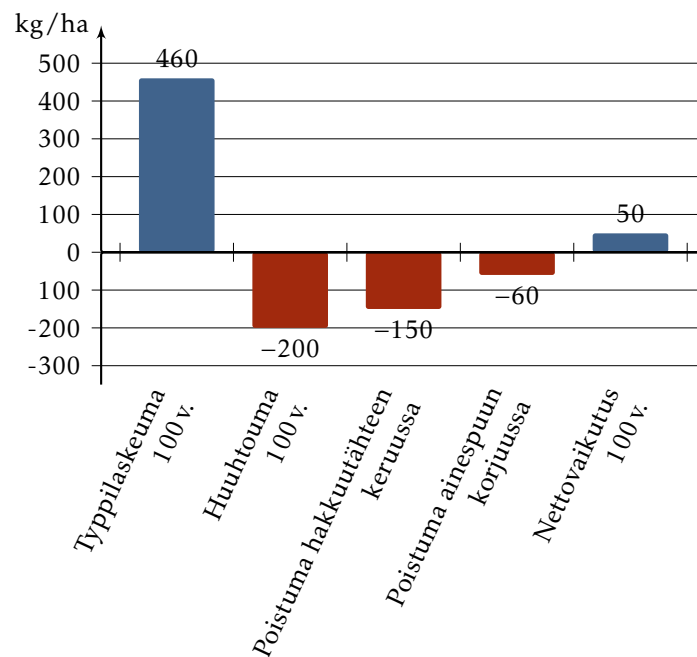
Etelä-Ruotsissa, jossa typpilaskeuma suljetussa metsässä on n. 25 kg/ha, on havaittu merkkejä, jotka viittaavat typpikyllästyspisteen lähestymiseen. Tällaisia merkkejä ovat ainakin:

- Vesistöjen nitraattikuormitus lisääntyy.
- Metsän typpilannoitus ei vaikuta odotetulla tavalla.
- Neulasten arginiinipitoisuus on kohonnut. (Lundborg 1993)

Typpilaskeuma Suomen metsissä on tällä hetkellä 3–6 kg/ha vuodessa. Koko Suomen kattavassa järvikartoituksessa todettiin keskimääräiseksi järvien epäorgaanisen nitraattityypen pitoisuudeksi 15 mN/m³. Tämän perusteella ilma- ja maaperäinen typpeä pidättyy vielä lähes täydellisesti terrestriselle valuma-alueelle.

(Kanninen toim. 1992) Hakkuutähteistä vapautuu typpeä suhteellisen hitaasti, ravinnerikkailla mailla noin 20 vuoden ajan, Pohjois-Suomessa ja karuilla mailla hajoamisaika jopa kolminkertaistuu.

Tyypillinen suomalainen havumetsän maaperä sisältää noin 2–5 tonnia typpeä hehtaarilla, josta suurin osa on sitoutunut orgaaniseen ainekseen. Koko puun biomassa sisältää 150–500 kg · N/ha. Yhden puusukupolven aikana typen nettolisäys ekosysteemiin on 0–500 kg/ha (huuhtoutuma 1(–3) kg/ha, laskeuma 3–6 kg/ha) Oksabiomassan talteenotto tarkoittaa käytännössä että tyyppihävikki nousee n. 0–250 kg/ha. Niukkaravinteisilla mailla pienikin ravinhukka näkyy puustossa ja muussa kasvistossa. Kuvassa 8 (s. 32) on esitetty tyyppillisen suomalaisen kuusivaltaisen havumetsän typen määrä 100 vuoden kiertoajan aikana.



Kuva 8: Tyypillisen suomalaisen havumetsän typen määrä 100 vuoden kiertoajan aikana. Hakkuutähteen keruun saannoksi on arvioitu 75 % koko hakkuutähdemäärästä. Mikäli hakkuutähteet kerätään, vähenee huuhtouma avohakkuun yhteydessä vastaavasti. (Hakkila & Fredriksson, 1996)

Muut ravinteet

Mineraalitasapaino voi vaikuttaa metsän pitkäaikaistuotantokykyyn. Kriittisimmät mineraalit ovat kalium (K), kalsium (Ca) ja magnesium (Mg). Mineraalien vähenemistä voidaan kompensoida lannoituksella. Parhaiten lannoitukseen sopii puun tuhka, joka sisältää metsästä viedyt ravinteet tyypeä lukuun ottamatta sekä hidastaa metsän happamoitumista kalkitusominaisuksiensa avulla. (Wihersaari 1996)

Pohjoismaisten tutkimusten mukaan ravinteiden menetys päätehakkuuvaiheessa muodostuu hakkuutähteiden korjuun seurauksena 1,5–3,5 -kertaiseksi normaaliin puunkorjuuseen verrattuna (Tennberg 1996). Kotimaisten tulosten mukaan fosforin menetys on kokopuun korjuun takia 2–5 , kaliumin 1,5–3,5 ja kalsiumin 1,5–2,5 -kertainen runkopuun korjuuseen verrattuna. (Mälkönen ym. 1985)

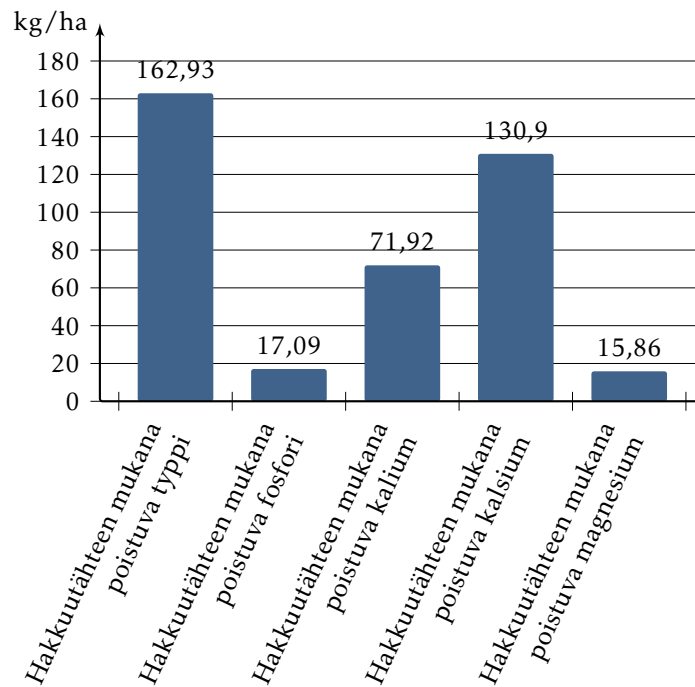
Hakkuutähteen korjuusta aiheutuvia ravinnehäviöitä käsitelleet tutkimukset ovat kohdistuneet lähinnä kokopuukorjuun aiheuttamiin ravinnehävikkeihin. Hakkuutähteen korjuussa saadaan käytännössä kerättyä enimmillään 75 % hakkuutähteestä, joten hakkuutähdekorjuun vaikutukset ovat enintään 3/4 edellä mainituista vaikutuksista. (Sauranen & Vesisenaho 1996) Kuusikon hakkuutähteiden keräyksen yhteydessä poistuneista ravinteista on yhteenveto kuvassa 9 (s. 34).

Hakkuutähteiden korjuu näyttää vähentävän useimpien ravinteiden huuhtoutumista ainakin hakkuun jälkeisinä vuosina. Typen, kalsiumin ja magnesiumin huuhtoutuminen kokopuuna korjatulta hakkuualalta oli 67–78 % siitä, mitä huuhtoutui perinteisen puun korjuun jäljiltä. (Rosen 1983)

Fosforia poistuu nopeasti hakkuun jälkeen pintahuuhtouman mukana, fosforin huuhtoutuminen vesistöön on sitä voimakkaampaa mitä enemmän sitä on saatavilla. Eli hakkuutähteen määrää vähentämällä vähennetään fosforikuormitusta vesistöön. (Haimi 1997)

Ruotsalaisten tutkimusten mukaan kalsium-tasapaino häiriintyy todistettavasti jo ainespuuhakkuun vaikutuksesta. Lisätty biomassan keruu epäilemättä lisää ravinnetappioita, mutta haittoja voidaan minimoida valitsemalla työmaat oikein ja välttämällä liian tarkkaa hakkuutähteen keräämistä. Hakkuutähteiden kerääminen on suositeltavaa mustikkatyyppin kangasmailla ja sitä rehevämmillä kangasmailla, turvemailta ei hakkuutähteiden keruuta suositella ravinnetappioiden vuoksi.

Ruotsalaisten 25 vuotta kestäneiden tutkimusten mukaan uuden puusukupolven kiertoaika pitenee hakkuutähteen korjuun vaikutuksesta vain kuusikolla.



Kuva 9: Kuusen latvusmassa ja sen ravintosisältö päätehakkuumetsikössä. (Nurmi & Kokko, 2001)

Tutkimuksessa kiertoajan pitenemiseksi laskettiin 0,5–4,5 vuotta. Tulos oli samansuuntainen rehevillä ja köyhillä mailla. Kun hakkuutähte kuivattiin hakkuualalla ja neulasat jäivät maaperään, oli tulos yhtä hyvä kuin normaalilla hakkuutähdemäärällä. Männikössä ei havaittu mitään eroja verrattuna normaaliin uudistamishakkuuseen. Testiasetelma oli käytännön tilannetta radikaalimpi, joten käytännössä erot ovat pienempiä. (Lundborg 1990)

4.3 Vaikutukset hiilivarastoihin

Haitallisten kasvihuonekaasujen sidonnassa maaperän hiilivarastoilla on huomattava merkitys. Tavallisen hakkuun jälkeen maahan jäävistä hakkuutähteistä poistuu hiiltä ilmakehään, ja aiheuttaa epäsuorasti hiilidioksidipäästöjä ilmakehään. Suurimmillaan päästöt ovat ensimmäisten 20 vuoden aikana, jolloin poistuu 90 % hiilestä. Jäljelle jäävä 10 % poistuu todella hitaasti, jopa satoja vuosia. (Palosuo ym.)

Kun hakkuutähteistä kerätään suurin osa, vähenee myös maaperään varastoituvan hiilen määrä. Biomassan sisältämä hiilimäärä poltetaan lämpölaitoksella, ja kyseinen kasvihuonekaasupäästö realisoituu samanaikaisesti. Puupolt-

toaineiden hiilineutraalisuus nykykäsituksen mukaan perustuu luonnossa tapahtuvien päästöjen ja poltossa syntyvien päästöjen samansuuruisuuteen.

Mikäli avohakkuu ja hakkuutähteiden kerääminen toistetaan 100 vuoden välein, on seurauksena maaperän hiilivarastojen hidas väheneminen. Mustikka-tyypin (MT) metsämaan hiilivarastot ovat tyypillisesti n. $10 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ (Liski & Westman). 20 vuotta hakkuutähteiden keräämisestä maaperän hiilivarastot ovat vähentyneet n. $0,2 \text{ kg} \cdot \text{C}/\text{m}^2$, verrattuna tavalliseen hakkuuseen (Palosuo ym.). Varastojen pieneneminen on siis n. 2 %.

100 vuoden kiertoajalla keskimääräinen hiilivarasto, joka kertyy maaperään hakkuutähteistä, on keskimäärin 11 % hakkuutähteiden sisältämästä hiilen kokonaismäärästä. (Wihersaari 2005)

4.4 Vaikutukset metsämaan eliöstöön

4.4.1 Sienet, mikrobit ja pieneliöstö

Tutkimustulokset eliöstön, mikrobiston ja ravinteiden muutoksista ovat erittäin tapauskohtaisia, joten yleistyksiä on vaikea tehdä. Mm. maaperän puskuriominaisuuksien vuoksi selkeitä tuloksia on vaikea havainnoida edes korostetuissa testiolosuhteissa. (Haimi 1997)

Oksissa, latvuksissa ja kannoissa esiintyy runsaasti sieniä. Ainoastaan muutama laji on patogeeninen, eli tuhoja aiheuttava, ja niistäkin vain harvoissa tapauksissa tiedetään tuhosienten suoranaisesti leviävän ympäröivään metsään tai alalle istutettuun taimikkoon. Mesisieni (*Armillaria mellea*) ja maannousemasieni (*Fomes annosus*) leviävät kantojen ja juuriston välityksellä. (Hakkila 1974) Hakkuutähteiden poistolla ei ole juurikaan vaikutusta sienituhoihin. Sienten ja bakteerien määrä on suurempi mikäli hakkuutähteitä ei kerätä, mutta käytännön merkitystä seikalla ei juurikaan ole. (Haimi 1997)

Mikäli korjuun yhteydessä poistetaan kaikki lahopuu metsästä, toimenpide saattaa vaikuttaa sienten leviämiseen. Sienten itiötuotanto on kuitenkin yleensä siksi voimakasta, että pienialaisilla toimenpiteillä ei liene mitään käytännön merkitystä. Tilanne on sama myös hakkuutähteissä esiintyvillä loissienillä, kuten verinahkasiennellä (*Stereum sanguinolentum*) ja Scleroderma lagerbergii -sienellä (Hakkila 1974) Mykorritsasienien määrään voimakkaat uudistushakkuut ja maanmuokkaus vaikuttavat kiistattomasti. Oksien ja latvusten poisto sen sijaan ei vaikuttane ainakaan suoranaisesti mykorritsasieniin. Karike- ja oksakasojen havunneulaspeitteelle ilmaantuvat sienet (kynsikkäät, juurekkaat ja malikat) sen sijaan poistuvat hakkuualalta hakkuutähteen mukana. (Hakkila 1974)

Ruotsissa on todettu, että typen liikatarjonta vaarantaa mykorritsasienien ja puun välisen symbioosin toimivuuden. Symbioosissa puun juuristo ja maaperän sienirihmasto ovat tiiviissä yhteydessä toisiinsa, jolloin molemmat hyötyvät: puun ravinteiden saanti lisääntyy ja sienet saavat palkkioksi hiilihydraatteja. Typpilaskeuma tai muu typen ylitarjonta häiritsee tätä yhteistyötä paljon enemmän kuin haposade. (Skogsindustrierna, 1997)

Hakkuutähteen keruun jälkeinen maanpinnan lämpötilan nousu on pienehkö tekijä maaeliöstön toiminnan kannalta, sen sijaan maahan lahoamaan jäävällä juuristomassalla on tärkeä merkitys maan mikrobitoiminnan kannalta. Suuri osa lahoavasta puuaineksesta hakkuualalla muodostuu nimenomaan puiden juuristosta ja hiusjuuristosta. Lahotessaan juuristo ruokkii laajalla alalla mikrobeja ja edelleen mikrobeja ravinnokseen käyttäviä pieneläimiä. Tällaisia pieneläimiä ovat alkueläimet, sukkulamadot, änkyrimadot, punkit ja hyppyhän-täiset. (Haimi 1997) Maanpinnan muotojen perusteella pintamaa voi paikoin kuivua ja paikoin soistua avohakkuun ja hakkuutähteen keruun seuraukse-na. Maamikrobien toiminnan kannalta parhaat olosuhteet ovat lämpimässä ja kosteassa humuksessa. Sääolojen vaihdellessa tällaiset olosuhteet löytyvät eri vuosina erilaisista paikoista.

Juuristoon yhteydessä olevat mykorritsasienet ja muut juuriston toiminnas-ta hyötyvät lajit kärsivät paikallisesti puuston poistamisesta ja juuriston toi-minnan lakkaamisesta. Kuitenkin juuriston lahoamisen myötä myös lahotta-jasienet hyötyvät lisääntyneestä lahopuun määrästä maaperässä. Sienirihmas-toa tuhoutuu myös maanmuokkauksen yhteydessä. Kuitenkin sienirihmasto ja maaperän eliöstö kestää yllättävän hyvin myös ihmisen aiheuttamia muutok-sia niiden elinympäristössä. Maaperän ja maaperän lajiston puskurointikyky muutoksia vastaan on yllättävän hyvä. (Haimi 1997)

Kun hakkuun yhteydessä maaperään liukenee suuria määriä ravinteita, on pintakasvillisuus normaalisti vielä kehittymätön hyödyntämään käytössä ole- via ravinnemääriä. Lisäravinteista vallitsee kova kilpailu maaperässä. Maape-rän mikrobit pystyy hyödyntämään hakkuutähteistä liukenevat ja lahoavasta hiusjuuristosta kertyvät lisäravinteet ensimmäisenä. Mikrobien toiminta vil-kastuu ja orgaanisen aineksen hajotustoiminta paranee. Mikrobeja ravinnok- seen käyttävät eläimet hyötyvät välillisesti mikrobien lisääntymisestä. Pin-takasvillisuuden kehityttyä kilpailu ravinteista kovenee ja mikrobien samaa osuus pienenee. (Haimi 1997)

Havupuumetsässä usein ongelmallinen humuskerroksen paksuuntuminen pysähtyy ja hajotustoiminta vilkastuu, kun pintamaan mikrobitoiminta vil-kastuu. Osaltaan mikrobien toimintaedellytyksiin ja hajotustoimintaan vai-kuttaa maanpinnan lämpeneminen hakkuutähdekasojen poistamisen seu-

rauksena. Mikrobitoiminnan kannalta optimaalinen tilanne olisi kohtuullinen kosteus, riittävän korkea pH sekä lämmin maaperä. (Haimi 1997)

Avohakkuun yhteydessä pohjaveden pinnan nousu voi heikentää ja jopa estää mikrobien toimintaa. Pohjaveden pinnan alla on anaerobiset olosuhteet, eikä maaliöstö pysty toimimaan. Hakkuutähteet hidastavat pintakasvillisuuden kehitystä ja pintakasvillisuuden haihduttavaa vaikutusta. (Haimi 1997)

4.4.2 Metsätähteiden talteenoton vaikutus luonnon monimuotoisuuteen ja uhanalaisiin lajeihin

Biologisen monimuotoisuuden kaventuminen on Suomessa, kuten kaikkialla maapallolla, nykyhetken vaikeimpia ympäristöongelmia. Biodiversiteetti eli biologinen monimuotoisuus tarkoittaa elävän luonnon kaikenlaista vaihtelua: erilaisten elinympäristöjen määrää, lajien lukumäärää ja lajiensisäistä perinnöllistä vaihtelua. (Wahlström 1992).

Suomessa on noin 42 000 eläin- ja kasvilajia (Wihersaari 1996). Lajien harvinaistumista selvitetty toimikunta (Komiteamietintö 1991) on ryhmitellyt uhanalaiset lajit neljään ryhmään: hävinneet, erittäin uhanalaiset, vaarantuneet ja silmällä pidettävät. Metsälajeista kolmeen ensimmäiseen luokkaan, eli varsinaisesti uhanalaisiin lajeihin 1,4 %. Suurin osa kasvi- ja eläinlajeista näyttää tulevan hyvin toimeen talousmetsissä.

Suomen metsävaltaisuuden vuoksi huomattava osa uhanalaisista lajeista ja niiden todennäköisistä esiintymispaikoista on talousmetsissä. Näin ollen metsäsuunnittelun kehittämällä voidaan parantaa uhanalaisten lajien elinmahdollisuuksia. Avainbiotooppien tunnistaminen ja huomioiminen metsätöitä tehtäessä on ratkaisevan tärkeää. On arvioitu, että alle 1 % yksityismetsistä tarvitsisi poikkeavan käsittelyn uhanalaisten lajien takia. Biologisen monimuotoisuuden suojelun tavoitteena ei ole Suomen palauttaminen ”luonnontilaan” vaan eri elinympäristöjen sekä lajiston ja sen geeniperimän säilyttäminen suotuisalla tasolla. (Wihersaari 1996)

Tärkeimmät syyt metsälajien uhanalaistumiseen ovat puulajisuhteiden muutokset, lahopuiden väheneminen sekä ylipäättään metsien hoitotoimet kuten ojitus, maanmuokkaus ja ikärakenteen muutokset. Uhanalaisten lajien kannalta keskeistä on suuriläpimittainen ja pitkälle lahonnut puu sekä myös lehtilahopuu, koska näistä lahoppuulaaduista on yleisesti puutetta talousmetsissä. (Komiteamietintö 1991) Energiapuun korjuussa kerättävä hakkuutähde on pieniläpimittaista ja nopeasti lahoavaa puuta. Hakkuutähde ei siis ole uhanalaisten lajien kannalta tärkeänä pidettävää lahoppuuta, sillä ohuet rangat ja

oksat lahoavat nopeasti ja tarjoavat elinpaikkoja lahoppuusta riippuvaisille lajeille vain muutaman vuoden. Järeiden runkojen lahoaminen sen sijaan kestää jopa vuosikymmeniä. Hakkuutähdettä tulee myös jatkossa jäämään niin paljon Suomen metsiin, että on vaikea ajatella hakkuutähteen korjuun muodostavan uhkaa metsien monimuotoisuudelle (Wihersaari 1996).

Kuusimetsän uudistaminen uudelleen kuuselle ei nykytietämyksen valossa ole ensisijaisesti kannattavin vaihtoehto. Luontaisesti rehevät maaperät uudistuvat metsäpalon jälkeen ns. isossa kierrossa lehtipuuvaltaiseksi taimikoksi, jonka alta kuusi myöhemmin valtaa tilaa lehtipuiden kustannuksella. Tällöin lehtipuuvaltainen taimikko on parantanut maaperän ravinnetilannetta lehtien ja lahon puuaineksen lannoitusvaikutuksen avulla.

Ns. pienessä kierrossa puuston uusiutuminen tapahtuu kaatuneiden puiden tilalle muodostuneiden pienten aukkojen kautta. Tällöin lisävalon seurauksena lehti- ja havupuiden taimettuminen on mahdollista. Seurauksena on maaperästä riippuen sekataimikko suurien kuusien välissä.

Hoidettu metsä poikkeaa luonnontilaisesta metsästä varsinkin lahoppuun määrän suhteen. Luonnontilaisessa metsässä eriasteisesti lahonnutta puuta voi olla 100 m³ hehtaarilla, kun taas hoidetussa talousmetsässä on usein vain muutamia kuutiometrejä. Eri lahoamisvaiheessa olevassa puussa elää suuri joukko erilaisia hyönteisiä, lahottajasieniä, punkkeja, yksisoluisia eliöitä, ankeroisia sekä kaikkien näiden petoja ja loisia. (Siitonen 1994) Lahoppuusta riippuvaisia eliölajeja on Suomessa useita tuhansia.

Hakkuutähteen vaikutus pintakasvillisuuteen perustuu suurimmaksi osaksi ravinnelisäykseen, mikä perustuu pääasiassa hakkuutähteistä liukeneviin ravinteisiin. Ruotsalaisessa tutkimuksessa verrattiin kokopuun korjuun ja tavanomaisen avohakkuun vaikutuksia pintakasvillisuuteen. Erot olivat pieniä noin kahdenkymmenen vuoden seurantajakson aikana. (Olsson & Staaf 1995) Yhden hakkuutähteen poistokerran pitkän aikavälin vaikutukset ovat siten todennäköisesti pieniä.

Ruotsalaisessa tutkimuksessa hakkuutähteen poiston vaikutuksista sienilajistoon todettiin, ettei hakkuutähteen keruu vaikuttanut suursienten itiöemien määrään eikä biomassaan, eikä myöskään mykorritsasienten ja hajottajasienten lukumääräsuhteeseen.

Hakkuutähteillä on merkitystä sekä lajien lisääntymismateriaalina että avohakkuualan ekosysteemiin vaikuttavana osatekijänä. Maaperän eläimet ja mikrobit ovat riippuvaisia mikroilmastosta, johon hakkuutähteillä on merkittävä vaikutus (Sohlenius 1982). Maaperäbakteereista on todettu, että hakkuutähteen poisto avohakkuualalta vähentää niiden määrää (Lundgren 1982).

Hakkuutähteiden talteenoton vaikutus hakkuupaikan koko eliölajistoon on vielä tutkimatta. Erilaiset muutokset vaikuttavat yleensä voimakkaasti maaperäeliöstön lajikoostumukseen, mutta katoavat lajit ja niiden toiminnot korvautuvat suhteellisen nopeasti muilla lajeilla (Haimi 1997). Hakkuutähteiden talteenoton seurauksena jotkut maaperäeliöt voivat paikallisesti vähentyä, mutta lajien uhanalaistumiseen toiminta tuskin vaikuttaa.

4.5 Happamoituminen

Suomen metsät ovat luontaisesti happamia kivilajien, havumetsäkasvillisuuden ja humidisen ilmaston vuoksi. Luonnontilaisissa metsissä puuston kasvu happamoittaa maaperää sukkession edetessä, sillä kasvava puusto tarvitsee etenkin maaperän emäskationeja (mm. NH^{4+} , Ca^{2+} , K^+). Luonnontilaisen metsämaan happamuus siis vaihtelee metsäekosysteemin sukkession myötä. Happamuutta neutraloivien ravinteiden biomassaan sitoutumisen myötä maa happamoituu, kunnes biomassaan sitoutuneet, maan happamuutta tasapainottavat emäsravinteet palautuvat esim. metsäpalon tai puun lahoamisen kautta maahan. (Koskenranta & Reiman 1997) Metsäpalossa osa ravinteista haihtuu kuumuuden vaikutuksesta ja poistuu näin kierrosta. Näin tapahtuu esimerkiksi suurelle osalle puuhun sitoutuneesta typestä. (Nurmi & Kokko 2001)

Talousmetsissä korjattavaan biomassaan sitoutuneet emäskationit poistuvat kasvupaikalta kokonaan, mikä vähitellen edistää maaperän happamoitumiskehitystä.

Happamoituminen on haitallista, sillä se lisää myrkyllisten aineiden liukenevuutta ja ravinteiden huuhtoutumista. Maaperän vastustuskyky happamoitumiskehitystä vastaan riippuu maan puskurikyvystä. Maan puskurikyvyn kannalta olennaisena pidetään maan orgaanisen aineksen ja kivilajin laatua. Puskurikyvyltään heikoimpia ovat karujen kasvupaikkojen lajittuneet maat, sillä niillä humuskerros on ohut ja maan vedenpidätyskyky sekä ravinteiden mineralisaatio heikko.

Happamuus rajoittanee typen mineralisaatiota kangasmailla aivan rehevimpiä kasvupaikkoja lukuunottamatta. Siis tyypillisillä hakkuutähteen keräyskohteilla mustikkatyypin kuusikoissa typen mineralisaatio on biomassan kasvun kynnystekijä. Mikrobien hajotustoiminta on yleensä sitä hitaampaa, mitä happamampaa maa on. Toisaalta maanmuokkauksessa tehokkaasti paljastunut pintamaa ja humus on lämpimämpi verrattuna ainespuuhakkuuseen. Lämpötilan nousu pintamaassa on keskimäärin 1–2 astetta.

Biomassan poistaminen metsästä merkitsee periaatteessa aina ravinteiden

poistumista ja maaperän happamoitumisen lisääntymistä. Normaali hakkuu, jossa metsästä poistetaan runkopuun teollisuudelle raaka-aineeksi kelpaava osa ja muu biomassa jää hakkuutähteeksi metsään, vaikuttaa happamoitumiseen Ruotsissa yhtä paljon kuin hapan laskeuma. Kokopuuhakkuun vaikutus maaperän happamoitumiseen on perinteiseen runkopuuhakkuuseen verrattuna 2–3 -kertainen. Käytännön kokeissa on mitattu 0,2–0,4 yksikön muutoksia pH:ssa. (Tennberg 1996) Olssonin ja Staafin mukaan (1991) hakkuutähteiden korjuu ei laskenut merkittävästi humuskerroksen pH:ta ainespuuna korjattuihin koelohihin verrattuna. Suomessa kokopuukorjuun vaikutukseksi on todettu n. 0,1 pH -asteikolla (Hakkila 1997, suullinen tiedonanto). Hakkuutähteen korjuun aiheuttama lievä happamoituminen on todettavissa vain humuksessa ja kivennäismaan pintakerroksessa. Kivennäismaan happamuuteen hakkuutähteiden korjuu ei ole juurikaan vaikuttanut (Staaf & Olsson 1996)

Vaikuttaa siltä, että eri tutkimuksissa on saatu jonkin verran toisistaan poikkeavia tuloksia hakkuutähteen korjuun vaikutuksesta maan happamoitumiseen. Todennäköisesti maaperän ominaisuuksien luontainen vaihtelu ja maaperän puskurointiominaisuudet ovat vaikuttaneet koejärjestelyistä saatuihin tuloksiin. Koetuloksista voidaan päätellä, että hakkuutähteiden korjuun aiheuttama ravinteiden menetys edistää hieman maan happamoitumista, mutta vaikutus ei ole Suomen oloissa tällä hetkellä merkittävä. On kuitenkin muistettava, että käytännössä hakkuutähteestä jää hakkuualalle 30–50 %, jolloin todellinen happamoittava vaikutus on samassa suhteessa kokopuukorjuun tuloksiin.

Uudistusalan nopeasti valtaava heinikko ym. kasvillisuus tuottaa maatuesaan kariketta, jonka ominaisuudet ovat huomattavasti paremmat kuin havupuukarikkeen. Pintakasvillisuudesta muodostunut karike on helposti hajotettavaa ja vähentää näin ollen pintamaan happamuutta. Tämän seurauksena maaeliöstön toimintaedellytykset paranevat. (Haimi 1997)

4.6 Vesistövaikutukset

Vesistöön tuleva veden laatua heikentävä kuorma jaetaan piste- ja hajakuormitukseen. Pistekuormitusten osuus kokonaiskuormituksesta on alentunut merkittävästi jätevesipuhdistamojen puhdistustehon paranemisen myötä. Hajakuormituksen määrä on pitkään pysytellyt melko korkeana, pääasiassa maatalouden ja myös metsätalouden toimien seurauksena. (Ahtiainen 1990)

Luonnontilaisessa metsässä ainekierto on varsin suljettu, puusto- ja pintakasvillisuus käyttävät orgaaniseen ainekseen sitoutuneet ravinteet tarkoin hyväkseen. Ahtiaisen (1990) tekemässä tutkimuksessa todettiin, että avohakkuu li-

säsi merkittävästi vuoden keskivaluntaa, kun valuma-alueella oli tehty runsaasti (57 % alueesta) avohakkuita. Erityisesti lisääntyi kevätylivaluma ja vastaavasti kesäalivaluma, avohakkuu siis lisäsi veden valunnan kausivaihtelua. Keväällä tulva-aika oli lyhyt mutta raju, kesällä valunta väheni entistään vähemmäksi. Avohakkuu ja maanmuokkaus vaikuttavat jonkin verran valuma-alueen veden laatuun (Ahtiainen 1990). Vaikutus on voimakkaampi, mikäli alueella suoritetaan lisäksi uudis- tai kunnostusojitusta.

Maanpinnan valaistus-, lämpö- ja kosteusolot muuttuvat avohakkuun johdosta. Myös kasvien ravinteiden otto häiriintyy ainakin 2–3 vuodeksi. Valuma-alueen vedet lämpenevät hieman avohakkuun jälkeen. Valaistus- ja lämpöolojen muutokset vaikuttavat huomattavasti purojen perustuotantoon ja hajotustoiminnan vilkastumiseen sekä levälajiston muutoksiin. (Ahtiainen 1990)

Avohakkuualueella lämpö- ja kosteusolojen muutokset kiihdyttävät hajotustoimintaa ja ravinteiden mineralisaatiota. Lisääntynyt hajotustoiminta ja kosteammat maaperäolot voivat lisätä maaperän anaerobisuutta. Maaperän anaerobisuutta osoittanee osaltaan nitriitti- ja ammoniumtyypen pitoisuuksien nousu (Ahtiainen 1990). Pinta-kasvillisuuden väheneminen voi muuttaa maaperän suotautumisolosuhteita ja sateen vaikutus voi korostua. (Vitousek 1983) Tällöin avohakkuualueen soistuminen alkaa, mikäli pintakasvillisuuden ja uuden puuston haihdutus ei pysty kompensoimaan soistumista edistäviä tekijöitä.

Pohjaveden pinnan nousun seurauksena orgaanisen aineksen huuhtoutuminen kasvaa maan happamimmasta pintakerroksesta. Seurauksena veden pH laskee ja vesi tummuu orgaanisen aineksen vuoksi. Alumiinin ja raudan pitoisuudet nousevat, sillä orgaaniseen ainekseen on sitoutunut rauta- ja alumiiniyhdisteitä.

Avohakkuun on todettu nostavan maaperän pH-lukua, lähinnä koska puuston emäskationeja ottava vaikutus on lakannut (Nykqvist & Rosen 1985). Kaliumin, kalsiumin ja magnesiumin pitoisuudet saattavat nousta avohakkuun ja maanmuokkauksen seurauksena. Suuremmat pitoisuudet selittyvät pääasiassa kasvaneella vesimäärällä. (Ahtiainen 1990)

Viileän pohjoisen havumetsävyöhykkeen alueella varastoituu runsaasti orgaanista ainesta turvemaille. Toisaalta podsolimailla voimakas huuhtoutuminen on tyypillistä. Yleensä luonnontilaiset suot toimivat suotimina, joihin pidätty kangasmailta valuvat ravinteet ja muut aineet. (Ahtiainen 1990)

Orgaanisen hiilen määrä vähenee voimakkaasti hakkuun yhteydessä, kun runkopuusto poistuu alueen biomassasta. Jäljelle jäävä biomassa hajoaa nopeammin kuin luonnontilaisessa metsässä, joten suuri osa pintakasvillisuuden or-

gaanisesta aineksesta häviää sukcession varhaisessa vaiheessa. Suurin osa tästä hiilestä poistuu hiilidioksidina, osa pidättyy maahan ainakin väliaikaisesti. Hiiltä myös erodoituu sekä huuhtoutuu pinta- ja pohjavesiin. (Ahtiainen 1990)

Hakkuutähteisiin jää huomattava määrä orgaanista ainesta, joka on välittömästi hajotustoiminnan kohteena (Ahtiainen 1990). Hakkuutähteet pienentävät ainakin osittain eroosiota.

Häiriintymättömässä metsäekosysteemissä fosforia on tarpeeseen nähden niukasti (Richey 1983). Avohakkuun seurauksena hajottajat mineralisoivat myös fosforia, ja sitä on runsaasti saatavilla. Aiemmin biomassaan sitoutuneet ravinteet huuhtoutuvat, kunnes uutta kasvillisuutta on muodostunut (Vitousek 1983). Metsäekosysteemistä fosforia poistuu hakkuun jälkeen puuston mukana, eroosion kuljettamana ja huuhtoutumalla. Humidisessa ilmastossa hydrologisilla tekijöillä on keskeinen merkitys mm. ravinteiden huuhtoutumisessa. (Rosen 1982).

Typen kierto häiriintymättömässä metsäekosysteemissä on melko suljettu (Vitousek 1983). Avohakkuun seurauksena puiden typenotto maaperästä keskeytyy ja toisaalta typen mineralisaatio kasvaa. Nitraattianioni liikkuu helposti maassa ja huuhtoutuu kationien kanssa helposti (Vitousek & Melillo 1979). Tällaisissa olosuhteissa maaperän tyyppiä lisäävän hakkuutähteen merkittävä vähentäminen vähentää huuhtoutumista huomattavasti. Hakkuualueiden kosteat ja lämpimät olot voivat lisätä sekä nitrifikaatiota että denitrifikaatiota (Vitousek & Melillo 1979). Nitraattitypen huuhtoutumista hakkuun jälkeen on tutkittu paljon. Tutkimusten mukaan hukkapuusta ja muusta hakkuutähteestä liukenee huomattavia määriä tyyppiä toisena ja kolmantena vuonna hakkuusta. Havupuuvältaisten metsien happamassa maaperässä nitrifikaatio käynnistyy lehtipuuvältaisia metsiä hitaammin. (Ahtiainen 1990)

Valumavesien kaliumpitoisuuden nousuun avohakkuun jälkeen vaikuttaa ennen muuta puuston poisto. Puuston maa-alkalimetallien oton lakkaaminen sekä hakkuutähteistä mineralisoituvien kalsiumin ja magnesiumin määrien kasvu yhdessä vaikuttavat kaliumpitoisuuden nousuun. (Ahtiainen 1990) Avohakkuualueilla, joilla hakkuutähteet on jätetty paikoilleen, vapautuu kaliumia, kalsiumia, magnesiumia sekä muita kationeja enemmän kuin jos hakkuutähteet kuljetetaan alueelta pois. Tämän seurauksena happamoituminen lisääntyy. (Nykivist & Rosen 1985)

Vesiensuojelullisesti haitallisimmat vaikutukset uudistushakkuusta aiheutuvat fosforin huomattavasta huuhtoutumisesta pohjaveden ollessa korkealla. Ilmiö jatkunee, kunnes hydrologiset ja maaperän häiriöt ovat tasoittuneet uuden kasvillisuuden vallattua hakkuualan. (Ahtiainen 1990) Fosforin huuhtou-

tumisen minimoinnissa hakkuutähteiden poistolla nopeutetaan pintakasvilisyyden ja taimikon syntymistä, jolloin huuhtoutumisaika vähenee. Maanmuokkaus ja uudistaminen on mahdollista heti hakkuun jälkeisenä keväänä tai kesähakkuun jälkeen jopa samana syksynä. Luontaisesti hakkuualalle syntynyt taimikko on tiheämpi ja siten myös pidättää enemmän ravinteita.

4.7 Energiapuun korjuun vaikutus metsien monikäyttöön

4.7.1 Marjastus ja sienestys

Maisemanhoito ja metsien monikäyttö, eli virkistysretkeily, marjastus, sienestys, metsästys, luontovalokuvaus jne., ovat tulleet yhä tärkeämmiksi tekijöiksi metsänhoidossa. Maisemanhoidon ja metsien monikäytön kannalta hoidettu ja ”siistitty” metsä on arvokkaampi kuin tiheä ryteikkö tai hakkuuaukko, jossa hakkuutähteet on jätetty maahan. Energiapuun ja hakkuutähteen korjuun jälkeen metsässä kulkeminen helpottuu, kun maassa on vähemmän hakkuutähdettä ja näkyvyyttä on enemmän.

Hoidettu metsä on usein hyvä marja- ja sienimetsä, kun marjasadon kannalta hyödyllinen varpukasvillisuus saa riittävästi valoa ja elinmahdollisuuksia. Marjastus ja sienestys on helpompaa, jolloin maamme runsaat marja- ja sienisadot saadaan korjattua paremmin talteen. (Saksa & Teittinen 1996)

Huomattava osa parhaista ruokasienistämme on mykorritsasieniä. Uudistushakkuut ja maanmuokkaus vähentää sienirihmaston määrää huomattavasti. Näin ollen ruokasienisato vähenee useiksi vuosiksi, ennen kuin sienirihmasto ehtii taas muodostua uudelleen. Oksien ja latvusten poisto sen sijaan ei vaikuttane ainakaan suoranaisesti ruokasienisatoon, sillä karike- ja oksakasojen havunneulaspeitteelle ilmaantuvat sienet ovat ruokasieninä vähäarvoisia tai ruuaksi kelpaamattomia. Tällaisia sieniä ovat kynsikkäät, juurekkaat ja malikat. Korvasieni ilmaantuu herkästi rikkoontuneelle metsämaalle. Koska hakkuutähteiden poisto parantaa maanmuokkauksen työn jälkeä, on korvasienen esiintymistodennäköisyys suurempi kuin tavallisilla maanmuokkausaloilla. (Hakkila 1974)

Avohakkuu sinänsä vaikuttaa aina marjasatoon vähentävästi. Mustikan biomassaa vähenee tuoreella uudistusalalla jopa kymmenesosaan alkuperäisestä määrästä. Tilanne tasoittuu tosin nopeasti ja lopulta sekä mustikka että puolukka hyötyvät hakkuutähteen poistosta. Vadelmasadot sen sijaan pienenevät hakkuutähteiden poiston vaikutuksesta, koska vadelma kärsii typen poisviennistä.

4.7.2 Metsästys

Metsästäjien liikkuminen alueella helpottuu, kun hakkuutähdettä ja muuta risukkoa on vähemmän. Nuoren metsän hoito parantaa myös metsikön kulkukelpoisuutta ja lisää ampumismahdollisuuksia. Näkyvyyden parantuessa vahingonlaukaukset vähenevät ja harrastus on entistä turvallisempaa.

Saaliseläinten lukumäärään hakkuutähteiden keräämisellä ei ole suurta vaikutusta. Tuoreista hakkuutähteistä jänisten ravintoon kuuluvat lähinnä lehtipuun oksat, mutta lehtipuun määrä on hakkuutähteen keruualoilla suhteellisen vähäinen. Taimikoissa kulkevat jänikset, hirvet ja metsäkanalinnut saavat muutakin ravintoa kuin istutustaimet, kun runsas luontainen taimiaines on pääravintona. Tiheässä taimikossa piennisäkkäille on enemmän suojapaikkoja kuin harvassa epätasaisessa taimikossa.

Kanalinnut suosivat hakkuualoja pesimäalueina. Varhaiskesän edulliset pienilmasto-olot uudistushakkuualoilla lienee merkittävin tekijä kanalintujen pesimäpiirin valinnassa. Lisäksi hakkuutähteet antavat pesiville linnuille suojan, joka on ratkaisevan tärkeä tekijä riistaeläinten viihtyvyyden edellytyksenä. Hakkuutähteiden merkitys kanalintukantojen suuruuteen on sen sijaan minimaalinen. (Hakkila 1974, Mikola 1973)

Nuoren metsän kunnostuksessa on jätettävä aina riittävästi lehtipuuta sekapuustoksi ja pensaskerrosta piennisäkkäiden suojaksi. Monimuotoinen metsä on niin lintujen kuin muidenkin nisäkkäiden kannalta edullinen. Runsaat riistaeläinkannat sallivat vastuullisen metsästämisestä. Hoidetussa metsäluonnossa harrastus on mielekästä ja rentouttavaa.

4.7.3 Retkeily

Ulkoilussa hakkuutähteiden vaikutukset ilmenevät lähinnä muutoksina ympäristön ulkonäössä ja kulkukelpoisuudessa. Ulkoilureittien läheisyydessä hakkuutähteiden keruulla on positiivinen vaikutus ulkoilijoiden luontoelämyksiin. Maaston siistiminen hakkuutähteistä parantaa maaston kulkukelpoisuutta, mikä on erityisen tärkeää puistoalueilla, kaupunkien läheisyydessä ja varsinaisten ulkoilu- ja vaellusreittien läheisyydessä. Yleensäkin hakkuutähteiden talteenotolla voidaan lyhentää sitä aikaa, jolloin metsätalouden toimenpiteiden aiheuttamat muutokset koetaan ulkoilu-ympäristössä haitallisena (Hakkila 1974)

Ulkoilijat arvostavat ennen kaikkea runsaspuustoisia ja järeitä metsikköjä, joissa hakkuutoiminnasta aiheutuvat muutokset — mm. hakkuutähteiden esiintyminen — ovat mahdollisimman vähäisiä ja huomaamattomia. Ulkoilijat

kokevat hakkuutähteistä aiheutuvat ympäristömuutokset kielteisiksi. Taus-
tasta riippumatta ulkoilijat katsovat hakkuutähteiden rumentavan metsikkö-
näkyviä. Ulkoilijat etsivät metsästä koskemattoman luonnon tuntua, jota hak-
kuutoiminta yleensä ja erityisesti hakkuualalle jäävät hakkuutähteet vähentä-
vät. Hakkuutähteet ovat kuitenkin jo sellaisenaan häiriötekijä, jonka poista-
minen kohottaa ulkoilu ympäristön laatua. (Hakkila 1974, Mikola 1973, Kemp-
painen 1999)

Hakkuutähteiden poistaminen vähentää myös maanmuokkauksen maiseman
tuhoavaa vaikutusta, sillä muokkausalalta normaalisti törröttävät maa- ja ri-
suläjät sekä sekaisin olevat rangat ja latvukset ovat selvästi huomaamatto-
mampia kuin perinteisillä hakkuualoilla. Maanmuokkaus onnistuu paikoin
kevyemmällä menetelmällä, jolloin maanpinnan korkeuserot ovat pienet mut-
ta muokkausjälki siitä huolimatta hyvä.

Äestyksessä voidaan käyttää pienempää muokkauspainetta, jolloin kiviä nou-
see pintaan entistä vähemmän (Hakkila, suullinen tiedonanto). Mätästys on-
nistuu heti hakkuun jälkeen, sillä normaali hakkuutähteiden painumisen
odottelu on tarpeeton. Näin ollen uuden taimikon perustaminen nopeutuu
1–3 vuotta, ja maisema alkaa metsittyä nopeammin. Nuori kasvava taimikko
on huomattavasti kauniimpi näkymä kuin myllätty ja kulkukelvoton maan-
muokkausala. Taimikon perustamisen nopeuttaminen on luonnollisesti sitä
hyödyllisempää, mitä enemmän ulkoilijoita alueella on.

Pohjoisimmassa Suomessa männiköiden avohakkuualojen hakkuutähteet ei-
vät tuota retkeilijöille ongelmaa, mutta tiheiden nuorten kasvatusmetsien har-
ventaminen ja hakkuutähteiden keruu on paikoin retkeilylle eduksi.

4.8 Ravinteiden palauttaminen tuhkalannoituksella

4.8.1 Tuhkan ominaisuudet

Puupolttoaineen tuhkapitoisuus ja laatu vaihtelee hyvin paljon. Tuhkapitoi-
suus on suurin niissä osissa puuta, missä kasvu tapahtuu, eli lehdissä ja neu-
lasissa sekä oksien ja latvan versoissa. Keskimäärin puupolttoaineiden tuhka-
pitoisuus on noin 2 %. (Recash 2006)

Nykyään puutuhka käytetään yleisimmin täytemaana tai ajetaan kaatopaikal-
le. Tässä toiminnassa aiheutuu lähinnä kuluja kuljetuskustannusten muodos-
sa.

Puun tuhka sisältää typpeä lukuunottamatta puun mukana tulleita ravinteita
juuri sopivassa suhteessa metsälannoitteeksi. Tuhka ei sisällä käytännös-
sä lainkaan typpeä, joten typpivajausta ei voi kompensoida tuhkalannoituk-
sella. Osa typpihävikistä korvautuu kuitenkin typpilaskeuman kautta. Mikäli

hakkuutähteiden mukana viety typpi palautetaan metsään typpilannoitteena, syntyy kasvihuonekaasupäästöjä noin 7 kg/CO₂ -ekv/(MW · h), eli saman verran kuin koko muussa tuotantoketjussa (Wihersaari & Palosuo 2000). Koska typpilannoitus ei juurikaan vaikuta puuston kasvuun rehevillä kasvupaikoilla, voitaneen kuusikon avohakkuualojen typenvajaus jättää kompensoimatta keinolannoitteilla.

Puutuhkan pH -arvo on 9–13. Kalkitusvaikutuksen ja ravinnesisältönsä vuoksi tuhka soveltuu hyvin maapeän pH:n nostoon sekä kompensoimaan ravinnetappiota.

Puhdasta puutuhkaa syntyy Suomessa suhteellisen vähän, sillä suurisa lämpölaitoksissa tuhka sisältää sekaisin puun ja turpeen tuhkaa. Turpeen tuhka on karkeampaa ja se sisältää vähemmän ravinteita kuin puutuhka. Turvetuhkassa on vähemmän erityisesti kaliumia. Turvetuhkan raskasmetallipitoisuudet ovat yleensä alhaisemmat kuin puutuhkan, mutta arseenipitoisuudet vastaavasti korkeammat. Lannoituskäytön kannalta turvetuhkan haittana on huomoinpi rakeistuvuus kuin puutuhkalla. (Recash 2006)

Leijukerroskattiloiden pohjatuhkaa ei pitäisi levittää metsään, sillä se koostuu pääasiassa petimateriaalista, eikä sisällä juurikaan ravinteita. Sen sijaan lentotuhka, joka saadaan talteen sähkösuotimilta, on ominaisuuksiltaan parempaa. Parasta lannoitetta on kuitenkin hyvin palanut arinakattilan pohjatuhka, sillä se sisältää vähiten raskasmetalleja ja on muutenkin hyvä lannoitekäyttöön. (Recash 2006)

4.8.2 Tuhkalannoitukseen soveltuvat kohteet

Kuten aikaisemmin on todettu, avohakkuun yhteydessä ei ole perusteltua palauttaa hakkuutähteiden keruun yhteydessä syntyneitä ravinnetappiota. Teknisesti tuhkan levitys hakkuualalle olisi helpompaa ja halvempaa kuin harvennusemetsiin, mutta ravinteista suuri osa huuhtoutuisi hukkaan aiheuttaen haittaa läheisille vesistöille.

Tuhka soveltuu parhaiten runsastyppisten mutta kalium- ja fosforiköyhien suomänniköiden lannoitukseen. Tällaisissa metsissä tuhkalla on saavutettu 2–4 m³/ha kasvunlisäys vuodessa, kun tuhkan levitysmäärä on ollut noin 4 t kuiva-ainetta hehtaarille. Mikäli tuhkan seassa on yli 2/3 turvetuhkaa, on levitysmäärän oltava kaksinkertainen. (Recash 2006)

Koska tuhkassa ei juurikaan ole typpeä, on sen lannoitusvaikutus kangasmailla puutteellinen. Karuilla mailla typpilannoitus vaikuttaisi puun tuotoskykyyn nopeasti ja runsaasti, kun taas rehevillä mailla typpilannoituksella ei

ole suurta vaikutusta. Periaatteessa tuhkalannoitusta voisikin käyttää rehevien kuusikoiden lannoittamiseen, missä typpilannoitus on tehoton. Tällaisissa kohteissa tuhka myös alentaisi maan pH:ta ja parantaisi siten maaperän eliöstön toimintaympäristöä.

Pohjois-Karjalassa tehdyn selvityksen perusteella yksityismetsissä on suometsiä noin 200 000 hehtaaria, joista noin 50 % olisi tuhkalannoituskelpoisia. Näistä tuhkalannoitus olisi tehtävissä maalevityksenä n. 2/3 ja lentolevityksenä 1/3. (Recash 2006) Pelkästään Pohjois-Karjalaan voisi siis levittää 400 000 tonnia tuhkalannoitetta. Tällä määrällä saavutettava kasvunlisäys olisi 200 000–400 000 m³/ha vuodessa.

Tilastojen mukaan Suomen voimalaitoksilla muodostuu tuhkaa yli 500 000 tonnia vuodessa, josta noin 150 000 tonnia on puutuhkaa. Vuonna 2003 puutuhkasta vain noin 10 % käytettiin metsien lannoitteeksi. (Recash 2006)

5 Laskelmien lähtötiedot ja menetelmät

5.1 Laskelmien lähtötiedot

Laskelmien tavoitteena on arvioida hakkuutähteiden keräämisen vaikutusta metsän uudistamiselle, metsän ravinnevaroihin sekä hakkuutähteiden energiakäytön arvoa päästökaupassa. Laskelmissa on käytetty keskimääräisen mustikkatyyppin (MT) kuusikon avohakkuukohteen tietoja. Laskelmien avulla pyritään muuntamaan tarkasteluun valitut ympäristövaikutukset rahassa mitattaviksi, ja siten taloudellisesti vertailukelpoisiksi. Lisäksi tarkastellaan hakkuutähteiden keräämisen vaikutuksia päästökaupan näkökulmasta.

Hakkuutähteiden keräämisen vaikutuksia metsän uudistamiskustannuksiin tarkastellaan yhdistämällä tutkimustietoja eri lähteistä.

5.2 Laskentamenetelmä: hakkuutähteiden vaikutus metsän uudistamiseen

Hakkuutähteiden vaikutusta metsän uudistamisen tehokkuuteen ja uudistuskuluihin on arvioitu monin eri tavoin. Seuraavassa kappaleessa on laskettu metsän uudistamisen kuluja työn laadun paranemisen kautta sekä käytävissä olevan pinta-alan pienenemisen aiheuttamien kustannusten kautta.

Paksu hakkuutähdepeitto vaikeuttaa metsämaan muokkausta, sillä äestyskoneelle tuottaa vaikeuksia varsinkin rehevillä mailla tavoittaa ja rikkoa kasojen alle jäävä maa. Osittain latvuskasat kaatuvat myös takaisin muokatun vaon

päälle. Paksun hakkuutähdematon alta maa sulaa hitaammin, joten maanmuokkauksen toteutus viivästyy keväällä, mikäli ei hyväksytä muokkausjäljen heikkenemistä. Muokkauksessa rikutun maanpinnan osuus lisääntyy 10 % kun hakkuutähteet kerätään pois. Paljastuneen kivennäismaan osuus nousi 5,2 %:sta lähes kaksinkertaiseksi 10,1 %:iin. Katso taulukko 2 (s. 48). (Oijala ym. 1999)

Taulukko 2: Muokkauksen peittävyys ja muokkauksessa paljastuneen kivennäismaan osuus (%) (Oijala ym. 1999)

Hakkuutähteen määrä (kg/ha)	Muokkauksen peittävyys	Paljastunut kivennäismaa
< 10 000	29,2	10,1
10 000–20 000	29,6	10,2
20 001–40 000	26,9	6,0
40 001–80 000	20,1	5,2

Kun hakkuutähteet on kerätty, ei paksuja hakkuutähdemattoja ole, vaan jäljelle jäänyt noin 30 %:n osuus tähteestä jakaantuu melko tasaisesti uudistusaluealle. Oijalan ym. (1999) tutkimusten mukaan suurimmat istutustiheydet löytyivät koelaitoilta, joilta hakkuutähde oli korjattu ja vastaavasti alhaisimmat tiheydet olivat vertailukoelaitoilta. Erot eivät kuitenkaan olleet kovin suuria, sillä istutustiheys vaihteli huomattavasti. (400–2 600 kpl/ha) Tutkimuksessa havaittiin myös, että istutustiheyden vaihtelu vähenee kun paljastuneen kivennäismaan osuus lisääntyy. Kun kivennäismaata oli paljastunut enemmän, pystyttiin taimista 90 % istuttamaan muokattuun maahan. Vastaavasti vertailukohteilla muokattuun maahan istutettujen taimien osuus jäi 76 %. Kivennäismaalle istutettujen taimien osuudet olivat vastaavasti noin 50 % ja noin 30 %. Katso taulukko 3 (s. 49).

Hakkuutähteiden määrällä ei näytä olevan merkitystä taimien kuntoon, tosin erilaisten taimien kehitystä uhkaavien tekijöiden määrä oli sitä suurempi, mitä enemmän hakkuutähdettä oli koelaitoilta. Istutustyön laatu heikensi taimen kehitystä lähes joka viidennen taimen kohdalla. Istutustyön laatu sisältää huonon istutuksen lisäksi istutuslaikun puuttumisen. Mikäli taimi on liian lähellä laikun reunaa tai laikku puuttuu kokonaan, nousee tukkimiehentäituhojen todennäköisyys. Istutettujen taimien pituuskehityksessä ei ole havaittu muutoksia hakkuutähteiden keräämisen seurauksena. Jos hakkuutähteistä vapautuvilla ravinteilla on merkitystä taimien kehitykseen, ero tulee näkyviin vasta 5–10 vuoden kuluttua istutuksesta. (Oijala ym. 1999)

Taulukko 3: Muokatulle, ”hyvälle” istutuskohdalle, kivennäismaalle, suoraan ja ”sopivaan” syvyyteen istutettujen taimien osuus (%)

Hakkuutähteen määrä (kg/ha)	Muokatulle alustalle istutettu	”Hyvä” istutuskohta	Istutus- taimista suorassa	Istutettu ”sopivaan” syvyyteen	Istutettu kivennäismaahan
< 10 000	90	67	86	88	48
10 001–20 000	85	65	88	81	52
20 001–40 000	88	65	82	92	37
40 001–80 000	84	65	83	92	40
80 001 <	76	60	71	93	29

Hakkuutähteen vaikutusta metsän uudistamisen tehokkuuteen ja uudistamiskuluihin arvioidaan työn laadun paranemisen kautta seuraavasti:

- Kun laskelmien mukaan 15 % pinta-alasta on tiivistyneen hakkuutähteen alla, ja siten käyttökelpotonta taimien istutukseen, saadaan todellinen istutustiheys seuraavasti:

$$\frac{85}{100} \cdot 2000 \frac{\text{taimea}}{\text{ha}} = 1700 \frac{\text{taimea}}{\text{ha}}$$

- Mikäli pyritään istuttamaan riittävä määrä taimia 15 % pienentyneelle pinta-alalle, saadaan todellinen istutustiheys seuraavasti:

$$\frac{2000 \frac{\text{taimea}}{\text{ha}}}{\frac{85}{100}} = 2353 \frac{\text{taimea}}{\text{ha}}$$

- Turhaan istutettujen taimien kustannukseen lasketaan taimikustannuksiin taimien keskimääräinen hinta sekä keskimääräinen istutuskustannus ostopalveluna.

$$\frac{\text{taimen hinta } 22 \text{ c}}{\text{taimi}} + \frac{\text{istutuskustannus } 23 \text{ c}}{\text{taimi}} = \frac{45 \text{ c}}{\text{taimi}}$$

- Ylimääräisen tiheyden aiheuttama kokonaiskustannus saadaan siis seuraavasti:

$$353 \text{ taimia} \cdot 0,45 \frac{\text{€}}{\text{ha}} = 159 \frac{\text{€}}{\text{ha}}$$

Hukkaan menneen maanmuokkaustyön kustannuksia ei ole laskelmissa huomioitu, koska hakkuutähteen määrä ei vaikuta maanmuokkaustyön hinnoitteluun.

- Taimien eloonjäämisen todennäköisyyttä arvioitaessa on lähtöoletuksena, että 30 % uhkatekijöistä tappaa taimen. Hakkuutähteiden poisto parantaa taimien henkinjäämisen todennäköisyyttä lähteiden mukaan keskimäärin 6 %. Näin ollen saadaan parantuneen eloonjäämisen todennäköisyyden vaikutus seuraavasti:

$$\frac{6}{100} \cdot 2000 \frac{\text{taimea}}{\text{ha}} = 120 \frac{\text{taimea}}{\text{ha}}$$

- Hehtaarikohtainen kustannussäästö saadaan kertomalla taimien lukumäärä taimikohtaisella kustannuksella:

$$120 \frac{\text{taimea}}{\text{ha}} \cdot 0,45 \frac{\text{€}}{\text{taimi}} = 54 \frac{\text{€}}{\text{ha}}$$

5.3 Laskentamenetelmä: menetettyjen ravinteiden taloudellinen arvo

Puuston häiriötön kasvu edellyttää, että kaikkia tarpeellisia ravinteita on saatavilla jatkuvasti sopivina pitoisuuksina ja määrinä. Puustolle tärkeitä ravinteita ovat typpi, fosfori, kalium, kalsium ja magnesium. Lisäksi esim. boorin puutos voi aiheuttaa vakavia kasvuhäiriöitä.

Perinteisessä ainespuun korjuussa hakkuutähteiden sisältämät ravinteet jäävät kasvupaikalle. Uudistamisvaiheessa ravinteita käyttävää kasvillisuutta on vähän, joten ravinteiden huuhtoutuminen voi olla voimakasta muutaman vuoden ajan. Huuhtoutumisen aikana hukataan suuri osa hakkuutähteiden sisältämistä ravinteista.

Puuston biomassan entistä tarkempi talteenotto voi olla riski metsämaiden puuntuotoskyvyn kestävyydelle. Riskinä on maaperän ravinnepitoisuuden heikkeneminen ja kangasmailla maaperän happamoituminen.

Menetettyjen ravinteiden merkitys maaperän puuntuottokyvylle on hieman ristiriitainen, sillä maaperän sisältämästä kokonaisravinnemäärästä vain pari prosenttia on kasveille käyttökelpoisessa muodossa. Pitkäaikaisvaikutuksista ei ole vielä riittävästi tietoa, jotta asian voisi varmuudella todeta. Kuitenkin on selvää, että ravinteiden väheneminen on riski maaperän puuntuotoskyvylle, mikäli hakkuutähteitä kerätään toistuvasti.

Tässä yhteydessä on syytä huomioida, että runkopuun teollinen hyödyntäminen on ollut Suomessa systemaattista vasta hieman yli 100 vuotta, eikä runkopuun talteenoton vaikutuksia maaperään ole vielä täysin selvitetty. On selvää, että hakkuutähteiden keräämisen vaikutukset maaperän ravinnetasapainossa on nähtävissä täysin vasta seuraavien puusukupolvien aikana, eli yli 100 vuoden kuluttua.

Taulukko 4: Päätehakkuukuusikon latvusmassan sisältämät ravinteet. Kilo-grammoina rungon kuorellista kuorellista kuutiometriä kohti. (Hakkila 1991)

Ravinne (kg/m ³)		Kuusi E-S	Kuusi P-S	Mänty E-S	Mänty P-S
Biomassa	Neulaset	59,4	76,3	19,2	30
	Oksat ja kuori	105	141,2	62,9	77,4
	Koko latvus	164,4	217,5	82,1	107,4
Typpi	Neulaset	0,627	0,805	0,233	0,364
	Oksat ja kuori	0,431	0,580	0,250	0,311
	Koko latvus	1,058	1,385	0,483	0,675
Fosfori	Neulaset	0,067	0,086	0,023	0,036
	Oksat ja kuori	0,044	0,060	0,040	0,046
	Koko latvus	0,111	0,146	0,063	0,082
Kalium	Neulaset	0,302	0,388	0,091	0,143
	Oksat ja kuori	0,165	0,221	0,141	0,168
	Koko latvus	0,467	0,609	0,232	0,311
Kalsium	Neulaset	0,361	0,463	0,069	0,108
	Oksat ja kuori	0,489	0,658	0,170	0,212
	Koko latvus	0,850	1,121	0,239	0,320
Magnesium	Neulaset	0,053	0,069	0,020	0,032
	Oksat ja kuori	0,050	0,066	0,039	0,050
	Koko latvus	0,103	0,135	0,059	0,082

Poistuneiden ravinteiden merkitys tulevan puuston kasvulle on toistaiseksi epävarmaa. Kun hakkuutähteet on kerätty täydellisesti pois tutkimustilan-teissa, on perustettujen taimikoiden kasvu hieman kärsinyt. Käytännön hakkuutähteiden keräämisessä ei täydellistä keräämisastetta edes tavoitella. Katso taulukko 5 (s. 52) ja taulukko 6 (s. 52).

Jos tärkeimpien menetettyjen ravinteiden määrä lasketaan ja ravinteille arvioidaan hinta keinolannoitteiden hintojen mukaan, saadaan kompensatio-lannoituksen arvo.

Verrattuna ensiharvennusvaiheessa toteutettuun hakkuutähteiden keruuseen, on päätehakkuun jälkeen poistuvien ravinteiden määrä moninkertainen. Kuitenkin haitta on suurempi, jos hakkuutähteitä kerätään harvennusmetsistä. Päätehakkuukuusikon latvusmassan sisältämistä ravinteista on kooste taulukossa 4 (s. 51).

Taulukko 5: Hakkuutähteiden keräämisessä poistuvat ravinteet Etelä-Suomessa, kuusen päätehakkuu.

Ravinne	Ainespuu m ³ /ha	Talteen- ottoaste %	Poistuva ravin- nemäärä kg/ha
Typpi	220	70,00	162,93
Fosfori	220	70,00	17,09
Kalium	220	70,00	71,92
Kalsium	220	70,00	130,90
Magnesium	220	70,00	15,86

Taulukko 6: Hakkuutähteiden keräämisessä poistuvat ravinteet Etelä-Suomessa, männyn ensiharvennus.

Ravinne	Ainespuu m ³ /ha	Talteen- ottoaste %	Poistuva ravin- nemäärä kg/ha
Typpi	50	70,00	29,72
Fosfori	50	70,00	3,99
Kalium	50	70,00	13,93
Kalsium	50	70,00	12,67
Magnesium	50	70,00	2,35

Kalsiumin ja magnesiumin puutteen ei ole todettu rajoittavan kangasmetsien kasvua Suomessa muutamaa harvinaista poikkeusta lukuun ottamatta. (Nurmi & Kokko 2001) Näissä laskelmissa keskitytään vain typen ja fosforin ravinmäärien muutoksiin. Hakkuutähteiden sisältämät ravinteet on määritellyt Hakkilan 1991 tekemien tutkimusten perusteella. Näillä tiedoilla voidaan arvioida eri kohteista poistuvien ravinteiden määrä.

Menetettyjen ravinteiden taloudellinen arvo voidaan laskea keinolannoitteiden hintojen kautta olettaen, että menetetty ravinteet kompensoidaan täysimääräisesti. Kompensaatiolannoitus oletetaan laskelmissa toteutettavaksi kivennäismaiden lannoituksessa yleisesti käytetyllä Metsän NP 1 lannoitteella. Lannoitteiden hinnat vaihtelevat vuosittain jatkuvasti. Laskelmissa on käytetty korvauslannoitteen hintana 380 €/t.

Korvauslannoitteen levityskustannuksena on käytetty maalevityksen hintaa Etelä-Suomessa 22 €/ha. Työnjohtokustannuksia ei ole otettu laskelmiin mukaan, sillä maanomistaja voi omatoimisuudella välttää ne.

Taulukossa 7 (s. 53) on esitetty Metsän NP 1 -lannoitteen sisältämät ravinneo-

suudet.

Taulukko 7: Metsän NP 1 -lannoitteen ravinnepitoisuus painoprosentteina.
(Yara, 2010)

Ravinnepitoisuus painoprosentteina	%
Kokonaistyyppi (N)	25
Fosfori (P)	2
Kalsium (Ca)	5,5
Magnesium (Mg)	1
Boori (B)	0,15
Sinkki (Zn)	0,1

Kun tiedetään menetetyn ravinteiden määrä kg/ha, voidaan laskea tarvittava määrä lannoitetta. Esimerkiksi fosforiravinteiden korvauskustannukset lasketaan seuraavasti:

$$\frac{\text{suosituksen fosforimäärä } 12 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{\text{poistuneen ravinteiden määrä } 4 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}} = \frac{\text{levityssuositus } 600 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}}{x}$$
$$x = 200 \frac{\text{kg}}{\text{ha}}$$

Lannoitemäärä 200 kg/ha kerrottuna lannoitteen hinnalla 380 €/t saadaan fosforin kompensatiolannoituksen hinnaksi 76 €/ha. Tähän lisätään lannoitteen levityskustannus 22 €/ha. Näin saadaan kokonaiskustannus 98 €/ha. Samalla periaatteella voidaan laskea kaikkien menetettyjen ravinteiden kompensoinnin hinta.

Ravinnetappioiden vaikutusten arvioiminen yksiselitteisesti on hyvin vaikeaa hakkuukohteiden monimuotoisuuden vuoksi. Samoin maaperän eri kerrosten sisältämät ravinnevarat ovat vaikeasti yleistettävissä. Maaperän ravinteista vain muutama prosentti on kasvien käyttökelpoisessa muodossa ja ravinteiden muuntamiseen käyttökelpoiseksi vaikuttaa moni tekijä. Näin ollen ravinnetasapainon muutoksia voidaan arvioida vain karkeasti, ja päätellä muutosten vaikutuksia lyhyellä ja pitkällä tähtäimellä.

5.4 Laskentamenetelmä: hakkuutähteellä tuotetun energian arvo päästökaupassa

Ilmakehän kasvihuonekaasut, joista hiilidioksidi ja metaani ovat tärkeimmät, estävät lämpösäteilyn pääsyä maapallon pinnalta avaruuteen ja vaikuttavat si-

ten kohottavasti maapallon lämpötilaan. Pitkäaikaiset mittaukset ovat osoittaneet, että ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on kohonnut jatkuvasti viimeisen 200 vuoden aikana.

Hiilidioksidipitoisuuksien kasvu johtuu pääasiassa ihmisen toiminnasta. Torjuttaessa kasvihuoneilmaston voimistumista hiilen kierron tasapainottaminen on keskeisellä sijalla. (Nurmi & Kokko 2001)

Kasvihuonekaasupäästöjen kasvua ja ilmastonmuutosta pyritään rajoittamaan kansainvälisin sopimuksin. Suomen osuutena EU:n sisäisessä taakanjaossa on pitää päästöt vuoden 1990 tasossa. Kuitenkin ennusteiden mukaan Suomen päästöt nousevat vuoteen 2010 mennessä, joten toimenpiteisiin ryhtymisen aika on juuri nyt.

Energiantuotanto on Suomessa merkittävin ihmisen toimintaan liittyvä kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaja. Fossiilisten polttoaineiden korvaaminen biopolttoaineilla on tehokas keino vähentää Suomen kasvihuonekaasupäästöjä. Biopolttoaineet ovat uusiutuvia, ja siksi poltossa vapautuvan hiilen voidaan ajatella sitoutuvan uudelleen kasvavaan puustoon.

Fossiilisten polttoaineidenkin kasvihuonekaasupäästöissä on eroja. Suomen oloissa merkittävintä on korvata kivihiiltä sekä öljytuotteita kuten esim. polttoöljyä uusiutuvalla energialla.

Esimerkiksi kivihiilen poltossa vapautuva hiilidioksidipäästö on noin 334 kg/(MW·h) Vuoden 2007 markkinahinnoilla kivihiilen polttajan oli maksettava n. 0,80 €/t tuotetusta hiilidioksidipäästöstä. Näin ollen lisäkustannus on ollut noin 0,27 €/(MW·h). Vuoden 2008 alussa päästöoikeuksien hinta on vaihdellut välillä 17–25 €/t. Näissä laskelmissa käytetään hiilidioksidipäästön kustannuksena 20 €/t.

Hakkuutähteellä tuotetun energian arvoa päästökaupassa verrataan kivihiilellä tuotettuun energiaan. ”Säästyneen” hiilidioksidipäästön hinta saadaan seuraavasti:

Kivihiilen hiilidioksidipäästö on 334 kg/(MW·h). Laskelmissa käytetty hiilidioksidipäästön hinta on 20 €/t. Näin saadaan hiilidioksidilla tuotetulle energialle päästöoikeuden hinnaksi:

$$20 \frac{\text{€}}{\text{t}} \cdot 0,334 \frac{\text{t}}{\text{MW} \cdot \text{h}} = 6,68 \frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}}$$

Hehtaarilta kertyvän hakkuutähteen energiasisällöksi on arvioitu 120 MW·h. Kun kerrotaan hehtaarin energiasisältö kivihiilen päästöoikeuden hinnalla,

saadaan hakkuutähteellä tuotetulle energialle hinta, joka säästetään kivihii-
lellä tuotettuun energiaan verrattuna.

$$120 \frac{\text{MW} \cdot \text{h}}{\text{ha}} \cdot 6,68 \frac{\text{€}}{\text{MW} \cdot \text{h}} = 801,6 \frac{\text{€}}{\text{ha}}$$

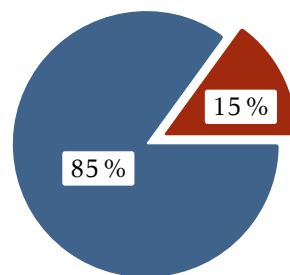
Kun kompensoidaan kivihiilellä tuotettua energiaa hakkuutähteellä, saadaan säästyneen hiilidioksidipäästön määrä/hehtaari seuraavasti:

$$120 \text{MW} \cdot \text{h} \cdot 0,334 \frac{\text{t}}{\text{MW} \cdot \text{h}} = 40,1 \text{t}$$

6 Tulokset

6.1 Hakkuutähdekasojen aiheuttama kustannus metsänuudistamisessa

Kun tarkastellaan ajouralle jäävän hakkuutähdematon osuutta koko uudistusalan pinta-alasta, huomataan että todellisuudessa puiden kasvulle käytävissä oleva pinta-ala on kutistunut huomattavasti. Mikäli ajourat ovat kymmenen metrin välein ja ajouran leveys on 3–4 metriä, on hakkuualan pinta-alasta noin 25 % ajouralla. Jos ajourasta noin 70 % on paksun tiivistyneen hakkuutähdepatjan peitossa, johon maanmuokkaus ei tehoa eikä alue näin ollen ole hyödynnettävissä metsän uudistamisessa, on tämän hukka-alan osuus yli 17 % koko pinta-alasta. Vaikka maanmuokkaus onnistuisikin osalla tiivistyneestä hakkuutähdepatjasta, jää silti arvioilta noin 15 % uudistusalan maapohjasta hyödyntämättä. Katso kuva 10 (s. 55).



Kuva 10: Uudistusalan kokonaisalan jakaantuminen hyödynnettävissä olevaan ja paksun hakkuutähdepatjan alle jääneeseen alaan. (15%/85%)

Suomen metsissä teollisen käytön ulkopuolella ovat biomassareservit voidaan jakaa kahteen luokkaan: hakkuusästö ja hakkuutähde. Hakkuusästöön kuuluu sekä ainespuuksi luokiteltava puuainees, joka sijaitsee suojeltavissa kohteissa että teollisuudelle eri syistä soveltumattomat hakkuukohteet.

Hakkuusäästöstä on luokiteltavissa potentiaalisesti energiareserviksi lähinnä markkinakelvoton pieniläpimittainen puu, jonka teollista hyödyntämistä vaikeuttaa pieni läpimitta. Hakkuutähde kuuluu kokonaisuudessaan potentiaaliseen energiareserviin, sillä sen jalostaminen ei ole nykytekniikoilla järkevää. (Hakkila ym. 1998).

Taimikoita perustettaessa tavoitteena on tasalaatuisen taimikon aikaansaaminen mahdollisimman nopeasti ja edullisesti. Jos taimikon tavoitetiheys on esimerkiksi 2 000 taimea/hehtaari, on normaalin hakkuun jälkeen käytännössä tiivistettävä istutusvälejä, mikäli pyritään hehtaarikohtaiseen tavoitetiheyteen. Ilman istutusvälien tiivistystä tiheydeksi jää 1 700 taimea/hehtaari. Mikäli käytetään hehtaarille tavoitemäärä 2 000 taimea, on toteutunut istutustiheys 2 353 taimea/hehtaari istutuskelpoisella alalla. Kun tavoitteena on saada perustettua mahdollisimman edullisesti hyvälaatuinen puusto, ei ole järkevää tuhata kalliita istutustaimia tiheyteen jollaista ei voi säilyttää edes ensiharvennukseen saakka. Järkevämpää on maksimoida istutustaimien osuus kasvatettavissa puissa ja hyödyntää luonnontaimia taimikon alkukehityksessä riittävän tiheyden takaamiseksi.

Voidaan todeta, että edellä mainitulla tiheydellä 2 353 taimea/ha tuhlataan 353 istutustaimea, jotka joudutaan harventamaan jo taimikon perkauksen yhteydessä pois. Eri organisaatioiden maksama istutustaksa metsäpalveluyrittäjälle on keskimäärin 23 c/taimi. Istutustaksat ovat nykyään keskihintoja kaikille olosuhteille, eikä työmaakohtaisia olosuhteita juurikaan huomioida. Yksivuotiaan kuusen taimen hinta on keskimäärin 20 c/taimi ja 2-vuotiaan kuusen taimen 25 c/taimi + alv. Lisäksi istutuskustannuksiin kuuluu työnjohtokustannuksia, mutta ne voidaan jättää laskelmien ulkopuolelle, koska työnjohtokustannus ei ole riippuvainen taimimäärästä. Tässä käytetään istutuksen kokonaiskustannuksena 45 c/taimi, sisältäen taimen hinnan sekä istutustyön. Näin ollen turhaan istutettujen taimien kustannus on

$$353 \frac{\text{taimi}}{\text{ha}} \cdot 0,45 \frac{\text{€}}{\text{taimi}} = 158,85 \frac{\text{€}}{\text{ha}}$$

Periaatteessa 15 % maanmuokkauksesta menee hukkaan, eli kustannuksena

$$130 \frac{\text{€}}{\text{ha}} \cdot 15\% = 19,5 \frac{\text{€}}{\text{ha}}$$

(Metsätilastollinen, 1999). Maanmuokkauksen hinnoittelussa tosin hakkuutähteillä ei ole merkitystä, sillä muokattavalla alalla olevat hakkuutähteet eivät juurikaan hidasta äestyskoneen toimintaa. Vain työnlaatu on heikompa

kuin hakkuutähteistä vapaalla hakkuualalla. Kaivinkonelaikutuksessa hakkuutähteet hidastavat hieman työtä, mutta urakointitaksassa ei erotella tak-
saa eri työmaiden olosuhteiden mukaan, vaan urakointi hinnoitellaan keski-
hintana kaikille kohteille. Hakkuutähteiden aiheuttamaksi turhaksi kuluksi
voidaan todeta siis yhteensä 158,85 €/ha.

Mikäli istutustiheys jää selvästi tavoitteesta, lisääntyy taimikon aukkoisuuden
riski selvästi. Mikäli hakkuutähdetasojen väliin istutetuista 1 700:sta taimes-
ta esimerkiksi 20 % kuolee, jää taimikon tiheydeksi vain 1 360 taimea/ha il-
man luonnontaimien täydennystä. Alitiheyden seurauksena on vajaatuottoi-
nen metsä, jonka ensiharventaminen on taloudellisesti kannattamatonta. Har-
van taimikon kasvaessa uhkaa myös puutavaran laadun heikkeneminen, sillä
oksien paksuus lisääntyy varsinkin männyllä nopeasti.

Kun arvioidaan istutettujen taimien eloonjäämistä, on huomioitava kaikki ris-
kitekijät yhteensä. Kuitenkin eri riskitekijöiden vaikutusta eloonjäämistoden-
näköisyyteen voi vain arvailla. Eloonjäämiseen vaikuttavat monet tekijät, esi-
merkiksi sääolosuhteet sekä eläin- tai hyönteistuhot. Jos esimerkiksi arvioi-
daan, että 30 % erilaisista kehitystä uhkaavista tekijöistä tappaa istutustai-
men, on runsaasti hakkuutähdettä sisältävällä uudistusosalalla eloonjäämistode-
näköisyys noin 81 %, kun vastaavasti vähän hakkuutähdettä sisältävällä
uudistusosalalla todennäköisyys on noin 87 %. Eloonjäämistodennäköisyys on
siis 6 % parempi uudistusaloilla, joilta on kerätty hakkuutähdettä. 2000 tai-
men istutuskustannukset ovat

$$2000 \text{ taimi} \cdot 0,45 \frac{\text{€}}{\text{taimi}} = 900 \text{ €}.$$

Euromääräisesti eloonjäämistodennäköisyyden vaikutus istutuskustannusten
tuhlaantumiseen on

$$900 \frac{\text{€}}{\text{ha}} \cdot 6\% = 54 \frac{\text{€}}{\text{ha}}.$$

Kuolleiden taimien lisäksi eri tavoin kärsineet taimet kasvavat hitaasti.

6.2 Hakkuutähteiden keruussa menetettyjen ravinteiden määrä ja arvo

Lannoituskustannukset on laskettu maalevityksen hinnoilla Etelä- Suomessa.
Mikäli kyseessä on usean metsänomistajan yhteishanke, on hankkeen organi-
soijana usein paikallinen metsänhoitoyhdistys, jonka työnjohtokustannukset
tulevat levityshinnan päälle. Maanomistaja voi tilata lannoituksen levityksen
myös omatoimisesti. Taulukossa 8 (s. 58) on esitetty Metsän NP 1 -lannoitteen
lannoituskustannukset.

Taulukko 8: Korvaavan lannoitteen kustannuksissa käytetyt parametrit, kuusikon kasvatusmetsä. Tuote: Metsän NP 1 (Yara, 2010)

Selite	Arvo	Yksikkö
Lannoitteen hinta	380	€/t
Lannoitteen levitysmääräsuositus	450–800	kg/ha
Ravinteen typpipitoisuus	25	%
Ravinteen fosforipitoisuus	2	%
Levityskustannukset	22	€/ha

Lannoittaminen on kannattavaa nuoreen tai varttuneeseen kasvatusmetsään. Tässä yhteydessä käytetään kangasmailla tehtävää lannoitusta laskennan lähtökohtana, koska hakkuutähteiden kerääminen tapahtuu pääasiassa rehevillä kangasmailla. Lannoituskustannuksilla saadaan arvo hakkuutähteiden keräämisen yhteydessä menetetyille ravinteille.

Poistuneiden ravinteiden kokonaismäärästä ja korvauslannoituksen hinnoista saadaan laskettua päätehakkuualan ravinnetappiolle teoreettinen hinta. Taulukossa 9 (s. 58) ja taulukossa 10 (s. 59) on esitetty poistuneen typpi- ja fosforiravinteen korvauskustannukset kuusikon päätehakkuussa.

Taulukko 9: Poistuneen typpiravinteen korvauskustannukset, kuusikon päätehakkuu.

Selite	Arvo	Yksikkö
Lannoitteen levityskustannus: ei työnjohtokustannuksia	22	€/ha
Lannoitteen hinta	380	€/t
Typpilannoitteen määrä levityssuosituksen mukaan	150	kg/ha
Poistuneen typpilannoitteen määrä	162,2	kg/ha
Tarvittava kompensatiolannoitteen määrä	649	kg/ha
Kompensatiolannoitteen hinta	269	€/ha

On huomattava, että päätehakkuun yhteydessä hakkuutähteiden sisältämistä ravinteista suurin osa ei päädy metsämaahan uuden puuston käytettäväksi, vaan huuhtoutuu pintamaan kautta pois hakkuualalta. Paikalla ei myöskään ole puustoa, joka voisi ravinteita hyödyntää. Näin ollen hakkuutähteen keräämisen yhteydessä poistuneen ravinteen arvo tulee laskelmissa todellista tilannetta suuremmaksi.

Tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan arvioida, että päätehakkuun yhtey-

Taulukko 10: Poistuneen fosforiravinteiden korvauskustannukset, kuusikon päätehakkuu.

Selite	Arvo	Yksikkö
Lannoitteen levityskustannus: ei työnjohtokustannuksia	22	€/ha
Lannoitteen hinta	380	€/t
Fosforilannoitteen määrä levityssuosituksen mukaan	12	kg/ha
Poistuneen fosforilannoitteen määrä	17	kg/ha
Tarvittava kompensatiolannoitteen määrä	850	kg/ha
Kompensaatiolannoitteen hinta	323	€/ha

dessä ravinnetappion merkitys uudelle puusukupolvelle on pienempi kuin ensiharvennusvaiheessa toteutetulla hakkuutähteen keräämisellä. Näin ollen poistuneen ravinnemäärän hinta on melko teoreettinen.

Kun laskemme ensiharvennuksen yhteydessä kerätyn hakkuutähteen sisältämän typpi- ja fosforiravinteiden määrän ja hinnan, voimme päätellä toiminnan vaikutusten suuruusluokan. Todettu ravinnetappio aiheuttaa lievän kasvutappion jäävän puuston kasvussa. Taulukossa 11 (s. 59) ja taulukossa 12 (s. 60) on esitetty poistuneen typpi- ja fosforiravinteiden korvauskustannukset kuusikon kasvatusmetsässä.

Taulukko 11: Poistuneen typpiravinteiden korvauskustannukset, kuusikon kasvatusmetsä.

Selite	Arvo	Yksikkö
Lannoitteen levityskustannus, ei työnjohtokustannuksia	22	€/ha
Lannoitteen hinta	380	€/t
Typpilannoitteen määrä levityssuosituksen mukaan	150	kg/ha
Poistuneen typpiravinteiden määrä	29,7	kg/ha
Tarvittava kompensatiolannoitteen määrä	118,8	kg/ha
Kompensaatiolannoituksen hinta	67	€/ha

Yleisesti käytetty lannoiteseos NP 1 sisältää sekä typpeä että fosforia. Näin ollen kompensatiolannoituksen kustannuksena voidaan käyttää poistuneen fosforin kompensoinnin kustannuksia, sillä fosforin korvaaminen lannoiteseos NP 1:n avulla vaatii suuremman lannoitemäärän kuin typen korvaaminen. Kompensaatiolannoituksen hinnaksi saadaan näin n. 100€/ha.

Mikäli puuenergian hankinta lisääntyy ja muuttuu jatkuvaksi toimintatavak-

Taulukko 12: Poistuneen fosforiravinteen korvauskustannukset, kuusikon kasvatusmetsä.

Selite	Arvo	Yksikkö
Lannoitteen levityskustannus, ei työnjohtokustannuksia	22	€/ha
Lannoitteen hinta	380	€/t
Fosforilannoitteen määrä levityssuosituksen mukaan	12	kg/ha
Poistuneen fosforilannoitteen määrä	4	kg/ha
Tarvittava kompensatiolannoitteen määrä	200	kg/ha
Kompensatiolannoitteen hinta	98	€/ha

si, on syytä kiinnittää huomiota ravinteiden palauttamiseen. Samalla kohteella toistuvasti toteutettu hakkuutähteiden kerääminen johtaa selviin ravinnetappioihin. Viimeistään päätehakkuun jälkeen ensiharvennusvaiheessa on tarpeen korvata ravinnetappiota korvauslannoituksella.

Tulosten perusteella voi todeta, että avohakkuun hakkuutähteiden kerääminen polttoon ei vaaranna tulevan puusukupolven kasvumahdollisuuksia. Mikäli hakkuutähteiden kerääminen on toistuvaa vuosisatojen ajan, saattaa seurauksena olla humuskerroksen asteittainen oheneminen, mikä lisää maaperän köyhtymisriskiä. Joissakin tapauksissa muut tekijät voivat kompensoida ravinnemenetyksiä, esimerkiksi typpilaskeuma tai ilmaston lämpeneminen.

Kuusikon avohakkuussa kertyvästä hakkuutähteestä kerätään n. 70 %. Lisäksi on suositeltavaa, että hakkuutähteet kuivataan hakkuualalla, jolloin suuri osa ravinnerikkaista neulasista karisee hakkuualalle. Näin on mahdollista minimoida ravinnetappiota, samalla kun hakkuutähteet kuivuvat tehokkaasti ja niiden lämpöarvo paranee. Neulaset aiheuttavat myös ongelmia lämpölaitoksella, sillä ne lisäävät laitoksen klooripäästöjä merkittävästi ja aiheuttavat korroosio-ongelmia tulistinpinnoilla.

Logistisesti hakkuutähteiden kuivatus hakkuualalla ei aina ole mahdollista, mutta kiistattomien etujensa vuoksi se on joka tapauksessa suositeltava toimintatapa.

Ravinteiden palauttaminen esimerkiksi tuhkan levityksellä ei ole mielekäs avohakkuuvaiheessa, sillä taimikon perustamisvaiheessa kasvuun lähtevä puusto ei pystyisi hyödyntämään täysin kaikkia ravinteita. Pahimmillaan seurauksena olisivat kasvavat huuhtoumat pienvesistöihin. Jopa hakkuutähteiden keräämisessä jäävien hakkuutähteiden sisältämistä ravinteista saattaa osa huuhtoutua ennen kuin uusi taimikko niitä ehtii hyödyntää. Huuhtoutumiseen vaikuttaa suuresti kohteen topografia sekä maaperän ominaisuudet.

Mikäli maaperään palautetaan ravinteita, se on järkevintä toteuttaa puuston harvennushakkuiden yhteydessä tai heti sen jälkeen. Tällöin puusto tarvitsee paljon ravinteita ja pystyy myös hyödyntämään kaikki ravinteet. Lisäksi lisäravinteet päätyvät ainoastaan kasvatettavaksi valittujen arvokkaimpien runkojen käyttöön.

6.3 Hakkuutähteiden arvo päästökaupassa

Kun kivihiiltä korvataan hakkuutähteillä, vähennetään hiilidioksidipäästöjä esimerkiksi kivihiileen verrattuna taulukon 13 (s. 61) mukaisesti.

Taulukko 13: Arvio hakkuutähteen arvosta päästökaupassa kun kivihiiltä korvataan metsätähteellä.

Oletus tai selite	Arvo	Yksikkö
Hehtaarilta kertyvän hakkuutähteen lämpöarvo keskimäärin	120	MW · h
Laskelmissa käytetty hiilidioksidipäästön oletusarvo	20	€/t
Hiilidioksidipäästöstä johtuva kivihiilen lisäkustannus	6,7	€/(MW · h)
Hiilidioksidipäästöjen vähennys hehtaaria kohti	40,1	t
Puupolttoaineilla saavutetun päästövähennyksen arvo	804	€/ha
Päästövähennyksen arvo päästökaupassa	6,68	€/(MW · h)

Puuenergian keskihinta on noin 14 €/ (MW · h). Hakkuutähteen ”kantohintaa” ei nykyään käytännössä makseta. Mikäli hakkuutähteestä maksettaisiin esimerkiksi 50 % päästökaupan tuomasta hyödystä, se tarkoittaisi laskelmissa käytetyillä luvuilla yli 400 euroa avohakattua kuusikkohehtaaria kohti. Puupolttoaineen hinta nousisi noin 3–3,5 €/ (MW · h), mutta lämpö- ja voimalaitosten hyöty olisi silti samansuuruinen verrattuna kivihiilen polttoon. Korvattaessa turvetta hyöty olisi samaa suuruusluokkaa.

6.4 Tuhkalannoituksen taloudellinen kannattavuus

Tuhkan levitys edellyttää tuhkan kovettamista tai rakeistamista, jotta estetään tuhkan pölyongelmat ja maaperän shokkivaikutukset. Itsekovetuksen kustannukset ovat noin 12 €/t. Rakeistuksen hinta on hieman korkeampi, mutta varsinaisia liikuteltavia laitteita ei toistaiseksi ole käytössä. Markkinahinta rakeistuksella on arvioitu olevan noin 15–25 €/t. (Recash 2006)

Tuhkan kaukokuljetus laitokselta metsään tapahtuu yleisesti kasettiperävauvuyhdistelmällä. Kuljetuskustannukset ovat tällaisella kalustolla tyypillisellä 50 km:n kuljetusmatkalla reilu 10 €/t. (Recash 2006)

Levityskustannukset ovat halvimmat maalevityksenä, jolloin voidaan hyödyntää hakkuuketjun kuormatraktoreita. Levityskustannukset organisointikustannuksineen ovat tällöin n. 15 €/t. (Recash 2006) Käytännössä levitys on suoritettava suometsiin talvella. Parhaimmillaan tuhkan levitys voisi tapahtua harvennushakkuun jälkeen tuoreita ajouria hyödyntäen.

Tuhkan helikopterilevityksen kokonaiskustannukset ovat tyypillisellä levitysmäärällä 4 tonnia hehtaarille noin 350–450 €/ha. (Ojala, 2010) Tuhkalannoitukseen saa KEMERA-tukea metsän terveyslannoituksena. Edellytyksenä tuen saannille on, että alueella on todettu ravinteiden puutosta. Tuen suuruus on 40–65 % toteutuneista kustannuksista (Recash 2006). Tuhkalannoitus helikopterilevityksenä vaikuttaa hinnaltaan tavanomaiseen keinolannoitukseen verrattuna kalliimmalta. Maalevityksenä tuhkalannoitus sen sijaan vaikuttaa olevan hieman halvempaa kuin tavanomainen keinolannoitus, mikäli tuhkan siirto työmaalle ei ole kohtuuttoman kallista.

6.5 Yhteenveto eri parametrien kustannuksista

Edellisissä kappaleissa esitettyjen osatekijöiden kustannusvaikutukset esitetään yhteenvetona taulukossa 14 (s. 62) ja taulukossa 15 (s. 63).

Taulukko 14: Yhteenveto eri parametrien kustannusvaikutuksista.

Selite	Arvo (€/ha)
Hakkuutähdekasojen poiston vaikutus taimikustannuksiin	159
Vähentyneen taimituhoriskin taloudellinen vaikutus	54
Ravinnemenetyksen kompensointikustannus	-100
Hakkuutähteiden arvo päästökaupassa	804

Ottaen huomioon päätehakkuun yhteydessä poistuvien ravinteiden pienehköt haitat, voidaan arvioida ravinnetappion haittavaikutukset noin 100 €/ha suuruiseksi. Arvio perustuu siihen, että tulevan puusukupolven kasvu ei juurikaan häiriinny ravinteiden poistumisesta hakkuutähteiden mukana. Näillä oletuksilla saadaan ravinnepoistuman korvauskustannukseksi alle 1 €/(MW · h). Suuruusluokka on kohtuullinen kaikille osapuolille.

Oheisista taulukoista voidaan todeta, että haitalliseksi arvioidun ravinnepoistuman kompensointi maksaa n. 100 €/ha. Tämä ravinnepoistuma on kuusikon avohakkuun todellista poistumaa pienempi, mutta kyseinen poistuma kompensoimalla vältyttäneen pitkäaikaisilta ravinnetappioilta.

Taulukko 15: Poistuneiden ravinteiden arvo kerättyyn energiaan verrattuna, kuusikon päätehakkuu.

Selite	Arvo	Yksikkö
Poistunut hakkuutähde kiintokuutiometreinä	64	m ³ /ha
Muunnoskerroin	2,5	i-m ³ /m ³
Poistunut hakkuutähde hakkeena	160	i-m ³ /ha
Poistuneen hakkuutähteen energiamäärä tuoreena	0,75	MW · h/i-m ³
Energiakertymä	120	MW · h/ha
Ravinnepoistuman korvauskustannus keskimäärin	100	€/ha
Ravinnepoistuman korvauskustannus/kerätty energia	0,85	€/(MW · h)

Hakkuutähteiden keräämisen vaikutukset metsän uudistamiseen ovat lähes pelkästään positiivisia. Eri tekijöiden yhteisvaikutus metsän uudistamiseen on arvioitu +213 €/ha arvoiseksi.

Taulukkoon 16 (s. 63) on koottu yhdistelmä hakkuutähteiden keräämisen vaikutuksista.

Taulukko 16: Yhdistelmä hakkuutähteen keräämisen vaikutuksista pääte-hakkuukohteelta.

Parametri ja skaala: + + +, ++, +, +/-, -, --, ---	Arvo
Maanmuokkaus	+ + +
Metsän uudistuminen	++
Taimikon kasvu	+/-
Metsänterveys	+
Metsämaan ravinnetalous	--
Maaperän happamoituminen	-
Maaperän hiilivarastot	-
Metsämaan mikrobit, sienet ja pieneliöstö	+/-
Vesistövaikutukset	++
Metsien virkistyskäyttö	+ + +
Kasvihuonekaasupäästöt	++

7 Tulosten tarkastelu ja epävarmuustekijät

Suomessa puukauppaa hallitsevat muutamat suuret metsäyhtiöt, jotka hankkivat raaka-ainetta omille sahoille ja sellu- ja paperitehtaille. Puukaupoista

valtaosa tehdään ns. pystykauppoina, jossa puun ostaja vastaa puun hakkuusta ja kuljetuksesta. Omistusoikeus siirtyy siis siinä vaiheessa kun puu kaadetaan. Puukaupan yhteydessä puuta hankkiva organisaatio voi halutessaan sopia myös hakkuutähteiden ja kantojen keräämisestä. Usein näillä raaka-aineilla ei ole varsinaista hintaa, sillä niiden poistamisesta on aiemmin mainittuja etuja metsän uudistamisessa. Usein hakkuutähteistä ei makseta mitään, mutta kantojen nostamisen yhteydessä vastineeksi toteutetaan maanmuokkaus.

Hakkuutähteiden keräämisen pitkäaikaisvaikutuksista ei ole yksiselitteistä varmuutta, mutta systemaattinen puuenergian käyttö voi johtaa haitallisiin vaikutuksiin maaperässä, jotka johtavat puuntuotoskyvyn laskemiseen. Maanomistajan kannalta tämä ei tietenkään ole toivottavaa. Pitkäaikaisvaikutuksista on saatavilla luotettavia tutkimustuloksia vasta tulevina vuosikymmeninä, sillä hakkuutähteiden energiakäyttöä on harjoitettu merkittävästi vasta 1990-luvulta lähtien.

Tulosten perusteella on nähtävissä, että lyhyellä tähtämellä maanomistaja hyötyy metsän uudistamisessa. Parantunut maanmuokkaus ja hyvät istutusolosuhteet edistävät uuden taimikon onnistunutta perustamista. Ravinnepiteisten hakkuutähteiden kerääminen pois aiheuttaa ravinteiden menetystä, mutta vasta toistuva energijakeen kerääminen samalta kohteelta johtaa metsätalouden tuoton alenemiseen. Ravinnetappion, jolla on vaikutusta metsän tuotokseen, rahallinen arvo on laskelmieni mukaan n. 100 €/ha.

Puuenergian lisäkäyttö hyödyttää nykyisellä toimintatavalla eniten puuenergian polttajaa, sillä päästökaupassa saatava säästö on huomattava. Jotta toiminta olisi kannattavaa myös metsänomistajalle, olisi puuenergiasta saatava riittävä korvaus.

Energiapuun hinnoittelussa on monta ongelmaa:

- maksukykyyn vaikuttaa ratkaisevasti kuljetusmatka polttolaitokselle
- määrän luotettavan mittaamisen vaikeudet
- eri puupolttoaineilla on erilainen kustannusrakenne
- eri laitoksilla on erilaiset laatuvaatimukset puupolttoaineelle
- päästökaupassa voi muutokset eri energioiden välillä olla nopeita

Periaatteessa kysyntä ja tarjonta johtavat oikeudenmukaiseen hinnoitteluun. Tämä edellyttää kuitenkin riittävän monta toimijaa alalla, sekä riittävästi potentiaalisia käyttökohteita puuenergialle. Kilpailutilanne nostaa puuenergian hintaa lähellä polttolaitoksia, mutta kaukana laitoksista toimintaa ei kannata harjoittaa edes nollahinnalla. On selvää että puuenergiaa hankkivat organisaatiot pyrkivät pitämään raaka-aineen hinnan alhaisena myös laitosten lähellä ja huippukysynnänkin aikana.

Ongelmalliseksi päästökauppaan perustuvan hinnoittelun tekee se, että tiedon saanti toteutuneista päästökaupoista on vaikeaa ja tapahtuu viiveellä. Samoin puuenergian tuotantoketju pitkäaikaisine varastointeineen voi aiheuttaa ongelmia oikeudenmukaisesta hinnan määrittämisestä.

Happamoitumisen taloudellista vaikutusta on vaikea arvioida erikseen. Hakkuutähteiden poiston lievä happamoittamisvaikutus vaikuttaa maaperäeliöstön pääasiassa haitallisesti. Seurauksena on maaperän ravinteiden hitaampi muuntaminen kasveille käyttökelpoiseen muotoon. Toisaalta puulajimme ovat sopuneet happamiin oloihin ja metsämaalla on verrattain hyvä puskurikyky happamuuden muutoksia vastaan. Maaperän happamuus rajoittaa typen mineralisoitumista eniten karuilla kasvupaikoilla. Tästäkin syystä hakkuutähteiden keruu on syytä rajoittaa kuusivaltaisille alueille, sillä puolukkatyypillä (VT) ja sitä karummilla kasvupaikoilla maaperän ravinteet ovat tarpeen täysimääräisesti kasvupaikan kasveille.

Epävarmuusanalyysi

Metsäluonnon monimuotoisuuden vuoksi tarkkojen laskelmien teko on erittäin vaikeaa. Olosuhteet luonnossa vaihtelevat dramaattisesti hyvinkin pienellä alalla. Vaihtelua aiheuttavat mm. maan pinnan muodot, maaperän rakenne, vallitseva kasvillisuus, pienilmasto, kohteen vesitalous sekä ihmisen toiminta.

Metsän uudistamisen kulujen arvioimisessa on pyrittävä eri tutkimuksista saatuihin keskimääräisiin lukuarvoihin. Taimien tuhoutumisriskin arvioiminen perustuu myös keskiarvolukuihin ja todennäköisyyden arvioimiseen. Laajasta aineistosta voidaan nähdä selkeitä joskin pieniä eroja, kun verrataan taimien selviytymistä erilaisilla hakkuualoilla. Paikallisesti eri kohteilla tuhoissa voi olla huomattavia eroja. Paikallisesti keskimääräisistä tuloksista poikkeamia voi aiheuttaa esimerkiksi tuhoeläimet tai –hyönteiset, epäpätevä taimien istuttaja tai epätyypilliset ilmasto-olot. Laajassa aineistossa paikallisten sattumien osuus vähenee ja voidaan tehdä luotettavia johtopäätöksiä.

Hakkuutähteiden keräämisessä menetettyjen ravinteiden kokonaismäärä on laskettavissa suhteellisen helposti. Hakkilan 1991 tekemien perusteellisten tutkimusten perusteella on laskettavissa erilaisen puuston sisältämät ravinteet. Hakkuutähteiden mukana poistuvien ravinteiden määrä on kuusikon avohakkuussa suuri, teoriassa menetettyjen ravinteiden arvo on yli 400 €/haa. Käytännössä haitallisen ravinnepoistuman tasoa ei vielä tiedetä.

Maaperän sisältämät ravinnemäärät voivat vaihdella huomattavasti jopa saman metsätyypin sisällä. Metsämaan sisältämistä ravinnemääristä vain pieni

osa on kasvien hyödynnettävissä olevassa muodossa. Tyypillisessä kuusikos-
sa kasvien ravinteiden hyödyntämistä hidastaa maaperän happamuus ja kyl-
myys. Maaperän kylmyydestä johtuen hajottajien hajotustoiminta on hitaam-
paa ja toimintakausi lyhyempi. Hakkuutähteiden kerääminen taas nostaa pin-
tamaan lämpötilaa kesällä, sillä varjostavaa hakkuutähdemassaa on vähem-
män. Lämpötilan nousun vaikutusta hajotustoimintaan on vaikea arvioida.

Hakkuutähdekasoista huuhtoutuvan ravinnemäärän arvioimiseen en ole löy-
tänyt varmaa tietoa. Ravinnetta varmasti liukenee kasan alle ja viereen, ja osa
huuhtoutuu kauemmas. Tämä on todettavissa horsmien ja vadelmien menes-
tymisenä kuusikon avohakkuualueilla muutama vuosi hakkuun jälkeen. Osa
ravinteista päätyy metsäojiin ja läheisiin vesistöihin, mutta todellista määrää
on vaikea arvioida.

Hiilidioksidipäästön hinnan määrittäminen on avainkysymys, kun määritel-
lään hakkuutähteiden energiakäytön arvoa päästökaupassa.

8 Johtopäätökset

Kioton ilmastokokouksessa neuvoteltiin toimenpiteistä, joilla ilmaston lämpe-
neminen saadaan pysähtymään. Suomi on sitoutunut vähentämään kasvihuo-
nekaasujen päästöt vuoden 1990 tasolle. Keskeinen edellytys kasvihuonekaa-
sujen vähentämisessä on vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Fossi-
ilisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöt ovat merkittävä kasvihuonekaasujen
lähde.

Kotimaisten lämpölaitosten polttoainevalikoimassa kivihiili, polttoöljy sekä
turve ovat kasvihuonekaasujen päästöissä ongelmallisia, ja niitä on pyrittävä
korvaamaan mahdollisimman paljon vähäpäästöisillä polttoaineilla.

Metsänomistajan kannalta hakkuutähteen keräämisestä on lyhyellä tähtäimel-
lä hyötyä, kun metsänuudistamisen toimenpiteet helpottuvat. Hakkuutähteen
keruu parantaa maanmuokkausjälkeä ja parantaa siten sekä istutuksen onnis-
tumisedellytyksiä että luonnontaimien itämistä. Uusi taimikko on tasainen ja
riittävän tiheä, joten laadukkaan metsikön kasvattamiselle on hyvät edelly-
tykset. Metsämaa on tehokkaassa käytössä, kun hakkuutähdekasojen alle ei
jää maata ”käyttämättömäksi”. Maanomistajan hyöty hakkuutähteen keruus-
sa on siis paremman taimikon saaminen tuhlaamatta rahoja tuottamattomaan
työhön. Kun lasketaan kustannussäästö kaikesta tuottamattomasta työstä met-
sänuudistamisessa, on säästö jopa noin 150–200 €/ha.

Nykytiedon perusteella yksittäisellä hakkuutähteen keräämisellä ei ole vaka-
via haittavaikutuksia metsä-ekosysteemille ravinteikkailla kangasmailla. Hak-

kuutähteiden keräämisen aiheuttaman ravinteiden vähenemisen luonnon puskurointikyky vaikuttaa kestävästi mustikkatyypin (MT) maaperällä ja sitä ravinteikkaammilla ilman merkittäviä haittavaikutuksia metsäluonnolle tai puun tuotoskyvylle. Hakkuutähteiden keruun aiheuttama ravinnehukka vastaa samaa määrää ravinteita, joka huuhtoutuu hakkuualalta pahimmassa tapauksessa vesistöön. Kuitenkin maatuvan biomassan kokonaismäärä vähenee, ja sillä voi olla vaikutusta maaperän ominaisuuksiin vuosisatojen kuluessa. Mikäli hakkuutähteiden keruu toistetaan jatkuvasti, kasvaa riski maaperän köyhtymiselle huomattavasti. Harvennushakkuiden yhteydessä toteutettava hakkuutähteiden keruu aiheuttaa lähes poikkeuksetta kasvutappiota, mikäli ravinnetappiota ei välittömästi korvata.

Hakkuutähteiden keruulla on muutamia positiivisia vaikutuksia metsäluontoon: ravinteiden huuhtoutuminen vähenee, maaperän pintalämpötila nousee ja luonnontaimien osuus lisääntyy maanmuokkauksen jälkeen. Lisäksi hakkuutähteiden keruu vaikuttaa monin tavoin hyvinkin pienellä alalla maaperässä. Vaikutukset ovat hyvin erilaisia eri paikoissa, ja luonnon monimuotoisuus ja puskurointiominaisuudet vaihtelevat maaperän, topografian, kasvillisuuden, karikkeen ominaisuuksien ynnä muiden seikkojen mukaisesti.

Mikäli valtakunnalliset tavoitteet puuperäisten polttoaineiden käytön lisäämisestä aiotaan toteuttaa, on metsäenergian hankintaa laajennettava vielä huomattavasti nykyisestä. Ratkaisevaa toiminnan laajenemiselle on puuenergiasta saatava hinta. Jos hinta nousee, on mahdollista kerätä metsäenergiaa laajemmalla alueelta kannattavasti ja huonommilta kohteilta. Käytännössä koko eteläisen Suomen metsät ovat tällöin potentiaalisia metsäenergian raaka-ainelähteitä. Sekä taloudellisesti että ekologisesti järkevimmät kohteet avohakkuun hakkuutähteiden keräämiselle ovat rehevien kasvupaikkojen kuusi-valtaiset metsät. Osa mäntyvaltaisistakin avohakkuista on taloudellisesti kannattavia kohteita, mutta tällöin ravinnetappiot tulisi korvata jo ensimmäisen hakkuutähteiden keruun yhteydessä.

Yksi keino ”maksaa” hakkuutähteestä on levittää tuhkalannoitetta korvaukseksi maanomistajan raaka-aineen hyödyntämisestä. Jotta tuhkan palauttaminen olisi käytännössä mahdollista, olisi energiaa hankkivalla organisaatiolla oltava järkevällä etäisyydellä tuhkalannoitteen tuotantoa ja riittävät logistiset valmiudet.

Toinen tapa maksaa oikeudenmukainen hinta hakkuutähteestä olisi korvauksen kytkeminen päästö-oikeuksien hintoihin. Näin metsähakkeen hinta vaihtelisi markkinatilanteen mukaan. Ongelmaksi muodostuisi päästökaupan markkinatilanteen seuraamisen vaikeudet ja puutteellinen tiedonkulku eri toimijoille. Käytännössä hinnoittelu tapahtunee paikallisen markkinatilan-

teen mukaan kysynnän ja tarjonnan pohjalta. Tämä johtaa väistämättä siihen, että huonojen kuljetusyhteyksien takana olevat kohteet ovat huonommassa asemassa raaka-aineen hinnoittelussa.

Suomen metsätalouden kannalta hakkuutähteen kerääminen energiaksi tuo huomattavia hyötyjä. Suurin hyöty lienee se, että käytännössä samoilla tai hieman alentuneilla kuluilla saadaan entistä parempi metsän uudistustulos. Metsäkeskusten seurannan mukaan metsien uudistamisen laatu on heikentynyt viimeisen vuosikymmenen aikana, kun uudistaminen on jäänyt lakimutoksen jälkeen metsänomistajan oma-aloitteisuuden varaan. Onnistunut metsän uudistaminen on lähtökohta tuottavan metsätalouden harjoittamiselle ja metsäteollisuuden puuhuollon jatkuvuudelle. Lisäksi hakkuutähteen kerääminen ja poltto lämpölaitoksissa tuo lisätyötä maaseudulle, jossa työpaikkoja on viime vuosina ollut erittäin vähän. Puunhankinnan jatkuvuuden kannalta maaseudun asuttuna säilyminen ja koneyrittäjien kapasiteetin ympärivuotinen työllistäminen on ensiarvoisen tärkeää.

Metsänviljelyn kustannukset ovat nousseet 1970-luvulta lähtien voimakkaasti. Yhdessä uudistusalan valmistamisen kanssa niihin kuluu miltei puolet metsänhoito- ja perusparannustöiden kokonaiskustannuksista. Vuotuinen metsänviljelypinta-ala on viime aikoina ollut noin 110 000 ha. Eri syistä hakkuutähteen keruu ei voi toteutua kaikilla kohteilla, joten teoreettinen keräyspinta-ala supistuu edellä mainittujen tietojen perusteella noin neljännekseen kokonaismäärästä. Mikäli Etelä-Suomen kuusikoiden pätehakkuun jälkeen on mahdollista saada entisillä kuluilla 10 % parempi uudistustulos, on parannuksen rahallinen arvo kuitenkin useita miljoonia euroja vuodessa.

Kiitokset

Haluan kiittää seuraavia henkilöitä arvokkaasta tuesta ja avusta tämän opin- näytetyön tekemisessä: Tero Vesisenaho, Jaakko Silpola, Gary Littler, Henri Jaakkola ja erityisesti Margareta Wihersaari. Kiitokset myös Metsämiesten sää- tiölle opinnäytetyölle myönnetystä stipendistä ja Mialle kärsivällisyydestä.

Lähdeluettelo

Ahokas, M., Kuitto, P-J & Paananen, M. 1997: Keski-Suomen metsäenergia -projekti 1994–1996. -56 s., Keski-Suomen liitto. Jyväskylä.

Ahtiainen, M. 1990: Avohakkuun ja metsäojituksen vaikutukset purovesien laatuun. -122 s., Vesi- ja ympäristöhallitus. Helsinki.

Björkroth 1984: Danger of reduced increment. - In Andersson, B. & Falk, S. ed. 1984: Forest energy in Sweden. Swedish University of Agr. Sci. Falun. 90–91.

Brunberg, B. ym. 1994: Projekt Skogbränsleteknik -slutrapport. -69 p., Skogforsk. Uppsala.

Elonen, J. & Korpilahti, A. 1996: Hakkuutähteen talteenoton vaikutus hakkuuajanmenekkiin ja tuotettavuuteen. Metsäteho katsaus 5/96. -6 s., Metsäteho. Helsinki.

Energiatyöryhmän muistio. Työryhmämuistio MMM 1997:4. -31 s. Helsinki.

Entry, J. ym. 1986: Effect of timber harvesting on microbial biomass fluxes in northern Rocky Mountain forest soil. Can. J. For. Res. 16: 1076–1081.

Hakkila, P. 1974: Hakkuutähteen talteenoton seurannaisvaikutukset. FF 21–23 s. METLA. Helsinki.

Hakkila, P. 1991: Hakkuupoistuman latvusmassa. FF 773. -24 s., METLA. Helsinki.

Hakkila, P. & Fredriksson, T. 1996 : Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. -92 s., Helsinki.

Helmisaari, H-S. ym. 1994: Suomen metsien kunto: Metsikön ravinnekierto ilman epäpuhtauksien aiheuttaman kuormituksen osittajana. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja. Helsinki.

Heiskanen, T. 1988: Ylä-Savon aluetaloustutkimus. Tutkimussuunnitelma. Tutkimusraportti 1988/3.

- Helynen, S. & Nousiainen, I. 1996: Biopolttoaineiden tuotanto- ja käyttöpotentiaalit. -115 s. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Helsinki.
- Honkasalo & Poukka. 1995: Energiaosuuskunta - Hakkeesta energiaa. - 32 s. Satakunnan ammattikork.koulu/Porin tekn. oppil.
- Jukka, L. toim. 1992: Metsänterveysopas. -168 s. Samerka Oy, Helsinki.
- Kanninen, M. toim. 1992: Muuttuva ilmakehä. SILMU. Helsinki.
- Keskimölä, A. 1994: Puuenergian hankinta ja käyttö Lapissa. -30 s. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 522. Rovaniemi.
- Komiteamietintö 1991: 30. Uhanalaisten eläinten ja kasvien seurantatoimikunnan mietintö. Ympäristöministeriö. Valtion painatuskeskus. Helsinki. -328 s.
- Koskenranta, R. & Reiman, H. 1997: Energiapuun korjuun vaikutuksia metsäekosysteemiin ja metsänuudistamiseen. -24 s., Keski-Suomen metsäenergia-projekti.
- Kuitto, P-J. 1983: Hakkuutähteiden korjuu monitoimikonehakkuun jälkeen. -24 s. Metsätehon moniste 25.1. Helsinki.
- Kurkela, T. 1994: Metsäntaudit. - Teoksessa Häyrynen, M. (toim.): Tappion taskukirja. 22. painos. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti. Jyväskylä. 206–213.
- Laitinen, H. 1993: Logistiikan merkitys puupolttoaineiden tuotantoketjussa. - s. BIOENERGIA-tutkimusohjelman julkaisu. Jyväskylä.
- Leikola, M. & Raivonen, M. 1980: Hakkuutähteen poistamisen vaikutus istutettujen kuusen taimien alkukehitykseen. FF 429. - s., Helsinki.
- Lundberg, A. 1990: Trädbränsle och skogsekologi. -23 p., Vattenfall. Väiligby.
- Lundberg, A. 1993: Skogbränsle minskar kvävelastningen. Vattenfall Research.

Lundgren, B. 1982: Bacteria in a pine forest soil as affected by clear-cutting. *Soil Biol. Biochem.* Vol. 14. 537–542. Great Britain.

Mikola, P. 1973: Metsätalouden ympäristövaikutukset ja niiden merkitys metsien käytön suunnittelussa. Helsingin yliopiston metsänhoitotieteen laitos. Tiedonantoja 9.

Mäenpää, I. & Männistö, J. 1995: Bioenergian yhteiskuntataloudelliset vaikutukset. -106 s. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja 111.

Mälkönen, E., Annala, E. & Kallio, T. 1985: Energiapuun talteenotto metsäekosysteemin kannalta. Teoksessa: Metsäenergian mahdollisuudet Suomessa, Pera -projektin väliraportti. *Folia Forestalia* 624. -76 s. Metsäntutkimuslaitos. Helsinki.

Nuortema, M. 1968: Über Mengenveränderungen der Borkenkägerfauna in eine sydfinnischen Waldgebiet in der Zeit von 1953 bis 1964. -50 s. *Acta Ent. Fenn.* 24.

Nurmi, J. & Kokko, A. 2001: Biomassan tehostetun talteenoton seurannaisvaikutukset metsässä. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 816. -80 s.

Nuuja, J. 1996: Palstahaketuksen logistinen ketju. Bioenergian tutkimusohjelman loppuraportti. -30 s. Joensuu.

Nykvit, N. & Rosen, K. 1985: Effect of clear-cutting and slash removal on the acidity of Northern Coniferous soils. *Forest Ecology and Management* 11: 157–169.

Ojala, E. 2010: Selvitys puu- ja turvetuhkan lannoite- sekä muusta hyötykäytöstä.

Olsson, B. & Staaf, H. 1991: Acidity in four coniferous forest soils after different harvesting regimes of logging slash. *Scand. J. For. res.* 6: 19–29.

Olsson, B. & Staaf, H. 1995: Influence of harvesting intensity of logging residue on ground vegetation in coniferous soils. *Journal of Applied Ecology* 32: 64–654.

- Richey, J. 1983: C, N, P and S cycles: major reservoirs and fluxes, the phosphorus cycle. Teoksessa: Bolin, B. & Cook, R. The major biochemical cycles and their interactions.
- Rieppo, K. & Poikela, A. 1995: Chipset-hakeharvesterin tuottavuus- ja kustannusanalyysi. -23 s., Metsäteho, Helsinki.
- Rosen, K. 1982: Supply, loss and distribution of nutrient in three coniferous forest watersheds in central Sweden. Swedish Univ. Agr. Sci., Dept For. Soils, Rep. in Forest Ecology and Forest Soils Uppsala. 41. 70 s.
- Rosen, K. 1983: Inverkan av helträdsutnyttjande på mängden tillgängling växtnäring och betydelse för markens produktionsförmåga. Skogsfakta 1: 3–9?
- Rosen, K. & Lundmark-Thekin, A. 1987: Increased nitrogen leaching under(under?) piles of slash - a consequence of modern forest harvesting techniques. Scand. For. 2: 21–29.
- Saalas, U. 1949: Suomen metsähyönteiset. Porvoo-Helsinki. -719 s.
- Saksa, T. & Teittinen, A. 1996: Metsähakkeen hankintakustannukset ja aluetaloudelliset vaikutukset. -29 s., Helsingin yliopiston Maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus. Mikkeli.
- Saksa, T. & Teittinen, A. 1996: Energiapuun hankinta suuressa mittakaavassa. -53 s., Helsingin yliopiston Maaseudun tutkimus- ja koulutuskeskus. Mikkeli.
- Seuranen, T. & Vesisenaho, T. 1996: Hakkuutähteen hankinta - Nykytekniikka ja toteutus. -45 s. Bioenergian tutkimusohjelma. Keski-Suomen Metsäenergia- projekti D 106. Jyväskylä.
- Siittonen, J. 1994: Monimuotoisuus metsien hoidossa. Julkaisussa: Hannelius, S. & Niemelä, P. (toim.) Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 564: 43–63.
- Sinclair, E. ym. 1992: Plantöverlevnad och tillväxt efter helträdsutnyttjande — sammanställing av fältförsök. Bioenergi, Utväckling & Miljö. Vattenfall.

Skogsindustrierna. Pressrevy 28/97.

Staaf, H. 1984: Buffering of negative effects. - In Andersson, B. & Falk, S. ed: Forest energy in Sweden. Swedish University of Agr. Sci. Falun. 96–97.

Tennberg, K. toim. 1996: Effekter av ökad biobräsleanvändning. -126 p., NUTEK. Stockholm.

Toropainen, M. 1984: Aluelämpölaitosten polttoainevalintojen kannattavuus. -117 s. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 162.

Vitousek, P. 1983: The effects of deforestation on air, soil and water. Teoksessa: Bolin, B. & Vook, R. The major biochemical cycles and their interactions.

Vitousek, P. & Melillo, J. 1979: Nitrate losses from disturbed forests: patterns and mechanisms. Forest Sci. 25: 605–619.

Wahlström, E. ym. 1992: Ympäristön tila Suomessa. Forssa.

Wihersaari, M. 1996: Biopolttoaineet ja ympäristö. Loppuraportin luonnos. -? s. Kauppa- ja teollisuusministeriö. Helsinki.

www.ruutupaperi.fi/Yara_Suomi/Metsanlannoitusopas/

www.yara.fi/fertilizer/products/the_forest_fertilizers/metsan_np_1.aspx

Haastattelut:

Hakkila, P. Tutkija. 1997

Haimi, J. Biologi. 9.12.1997.

Pitkänen, E. Metsätraktoriyrittäjä 28.12.1997.

Hämäläinen, V. Metsähallitus. 1997.