

Juha Kaitera ja Heikki Nuorteva

Maitikkauute-aineiden vaikutus tervasroson (*Cronartium flaccidum* ja *Peridermium pini*) rihmastoviljelmien kasvuun keinoalustoilla

Seloste artikkelista: Kaitera, J. & Nuorteva, H. 2010. Effects of *Melampyrum* extracts on the growth of axenic cultures of *Cronartium flaccidum* and *Peridermium pini*. *Silva Fennica* 44(2): 197–202.

<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf442197.pdf>

Tervasrososienet ovat aiheuttaneet vakavia epidemioita etenkin viimeisten 20–40 vuoden aikana eri mäntylajeilla Euroopassa. Pahimmat tautiepidemiat ovat esiintyneet 1990-luvulla ja etenkin 2000-luvun alussa metsämännyllä (*Pinus sylvestris*) Pohjois-Fennoskandiassa. Tervasrosoepidemia jatkuu edelleen voimakkaana Pohjois-Ruotsissa. Tervasrosoa aiheuttavat ruostesienet, *Cronartium flaccidum* ja *Peridermium pini*, jotka ovat nykyäsiytyksen mukaan saman lajin eri muotoja. *Cronartium flaccidum* leviää luonnossa väli-isäntäkasvien kuten käärmepistonyrtin (*Vincetoxicum hirundinaria*), kuusioiden (*Pedicularis* spp.), pionien (*Paeonia* spp.) ja etenkin maitikoiden (*Melampyrum* spp.) välityksellä. *Peridermium pini* leviää vain suoraan männystä mäntyyn. Nuorissa männiköissä epideemisenä esiintyvä tervasroso leviää pääasiassa metsämaitikan välityksellä, kun taas kangasmaitikka on hyvin kestävä tervasrosoa vastaan. Syitä maitikkalajien tervasrosoalttiuseroihin ei tiedetä, mutta ne voivat johtua kasvien lehtien erilaisesta kemiallisesta koostumuksesta.

Tutkimuksessa selvitimme eri maitikkalajien steriloitujen ja sterilioimattomien uuteaineiden vaikutusta

tervasrosokantojen kasvuun keinoalustoilla laboratoriossa. Keinoalustoina käytimme erikoisagaralustoja, joihin oli lisätty mm. vitamiineja, mitkä mahdollistivat tervasrososientien kasvun isäntäkasvin ulkopuolella. Sieni-isolaatit kerättiin molempien tervasrosomuotojen aiheuttamista tuhokohteista eri puolilta Suomea 1994–2005. Helmi-itiöitä idätettiin ensin noin vuoden ajan sekä yksi- että moni-itiöeristyksinä. Yksi-itiöeristykset eivät tuottaneet kasvavia sienikolonioita. Sen sijaan moni-itiöryhmistä saatiin kasvatettua sienikasvustoja kasvukokeisiin. Kasvukokeisiin valittiin 5 isolaattia sekä *C. flaccidum*- että *P. pini*-tervasrosomuodoista. Ensimmäisessä kokeessa erikoisalustoille lisättiin sterilioimatonta *M. pratense*:n ja *M. sylvaticum*:n lehtien murskaamisen jälkeen syntyntytää lehtiutetta. Toisessa kokeessa erikoisalustoille lisättiin sterilioitua *M. pratense*:n, *M. sylvaticum*:n ja *M. nemorosum*:n lehtiutetta. Kustakin isolaatista (10 kpl) kasvatettiin 5 toistoa 4–6 kk ajan 24 °C:ssa. Rihmastojen pinta-alat mitattiin poletilla viikon kuluttua siirrostuksesta, jonka jälkeen isolaattien kasvu mitattiin kuukauden välein.

Sterilioimaton *M. pratense*:n lehtiute vähensi merkittävästi *P. pini*-isolaattien kasvua kontrolliin verrattuna ensimmäisessä kokeessa. *Cronartium flaccidum*-isolaattien kasvu lisääntyi aluksi hieman mutta väheni 4–6 kk:n kasvatuksen jälkeen. Tervasrosoisolaattien välillä ilmeni suurta kasvunvaihtelua. Steriloidut lehtiutteen eivät vaikuttaneet merkittävästi isolaattien kasvuun toisessa kokeessa. *Cronartium flaccidum*-isolaattien kasvu lisääntyi hieman kun taas *P. pini*-isolaattien kasvu väheni uutealustoilla verrattuna kontrolliin. *Peridermium pini*-isolaatit kasvoivat nopeammin ja degeneroivat hitaammin kuin *C. flaccidum*-isolaatit kaikilla uutealustoilla. Molemmissa kokeissa kasvatusaika, isolaatti, kasvatusalusta ja niiden yhteisvaikutus selittivät merkittävästi kasvun vaihtelua mallituksissa. Ruostesienimuoto ei sen sijaan selittänyt merkittävästi em. kasvun vaihtelua.

Tässä tutkimuksessa saatiin tuotettua tervasrosan rihmastokasvustoja ainoastaan moni-itiöviljelyinä. Steriloimattomilla maitikka-uutteilla oli voimakkaampi vähentävä vaikutus isolaattien kasvuun kuin steriloiduilla lehti-uutteilla. Kasvureaktiot olivat erilaiset eri tervasrosomuotojen isolaateilla, eikä tervasrosomuoto selittänyt suuresti kasvureaktioita. Sieni-isolaatti sen sijaan selitti selvästi muotoa paremmin kasvureaktioita. Tulos tukee käsitystä eri tervasrosomuotojen läheisestä sukulaisuudesta. Maitikka-uutteiden vähäinen kasvua vähentävä vaikutus väli-isäntäkasvia vaativien tervasroso-isolaattien kasvuun voi olla osoitus sienen kyseisen muodon sopeutumisesta leviämään maitikoiden avulla.

■ MMT Juha Kaitera, Metsäntutkimuslaitos, Muhoksen toimipaikka, MMT Heikki Nuorteva, Vantaan toimipaikka
Sähköposti: juha.kaitera@metla.fi

Saila Varis, Anne Pakkanen,
Aina Galofré ja Pertti Pulkkinen

Männyn siitepölyn kaukokulkeutuminen ja geenivirran mahdollisuus

Seloste artikkelista: Varis, S., Pakkanen, A., Galofré, A. & Pulkkinen, P. 2009. The extent of south-north pollen transfer in Finnish Scots pine. *Silva Fennica* 43(5): 717–726.
<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf43/sf435717.pdf>

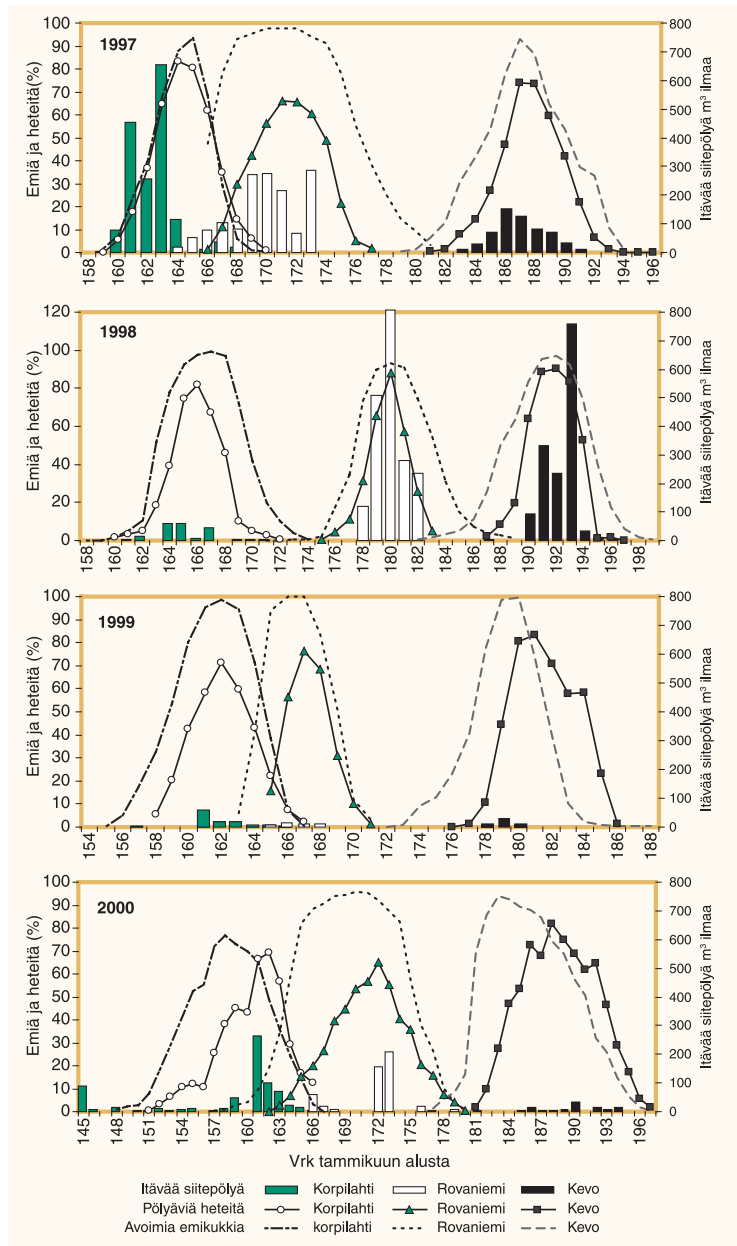
Mänty (*Pinus sylvestris* L.) tuottaa pohjoisen karuissa olosuhteissa harvoin siemeniä, mikä johtaa metsän huonoon luontaiseen uudistumiseen. Hyvänä siemenvuotena osa siemenistä voi olla kaukokulkeutuneen siitepölyn hedelmöittämiä, jolloin niiden sopeutumiskyky pohjoisiin olosuhteisiin voi olla heikko. Ilmaston lämmitessä ja olosuhteiden muuttuessa siitepölyn kaukokulkeutuminen voi kääntyä männylle positiiviseksi ilmiöksi kun etelästä kulkeutuva siitepöly voi kuljettaa mukanaan sopeutumista helpottavia geenejä. Tämä geeniviraksi kutsutun ilmiön on mallinuksissa todettu

kulkevan populaatioiden keskustasta sen reunoille ja näin estävän reuna-alueiden kasvien sopeutumisen paikallisiin olosuhteisiin. Suomessa pohjoiset männyn ovat levinneisyysalueensa reunamilla.

Siitepölyn kaukokulkeutumisesta on raportteja jo vuodelta 1919, jolloin mm. männyn siitepölyä havainnointiin Pohjanlahdella 55 km rannikolta. Tuoreimmat tutkimukset osoittavat eri lajien siitepölyn pystyvän nousemaan yli kilometrin korkeuteen ja kulkeutuvan ilmavirtausten mukana jopa 1 000 km päivässä.

Jotta kaukokulkeutumisesta olisi hyötyä geenivirtaa ajatellen, siitepölyn pitää olla elävää myös pitkän matkansa jälkeen. Männyn siitepöly on suhteellisen kuivaa ja sen itävyyden on raportoitu säilyvän hyvänä 24 tunnin ilmalle ja valolle altistuksen jälkeen. Mutta sekään ei vielä riitä, vaan siitepölyn laskeutumispaikassa täytyy olla avoimia emikukkia ja niissä pölytyspisara johon siitepöly tarttuu. Männyn kukinta alkaa ensin etelässä, ja saman alueen emikukat avautuvat ennen kuin paikallinen siitepöly pölyää hedekukasta.

Tutkimme siitepölyn kaukokulkeutumisen mahdollisuutta, sen ajoittumista emi- ja hedekukintaan nähden sekä siitepölyn itävyyttä vuosina 1997–2000 Keski-Suomessa Korpilahdella, Pohjois-Suomessa Rovaniemellä ja pohjoisimmalla tutkimusalueella Kevolla. Kevolla tutkimusmetsikkö sijaitsee n. 50 km männyn puurajan pohjoispuolella. Kaikissa metsiköissä ilman siitepölymääriä mitattiin Rotorodkeräimillä, joita pyöritettiin 5 minuuttia klo 12 ja 15 välillä. Silloin ilmankosteus on pienimmillään ja siitepölyä todennäköisimmin ilmassa. Siitepölyhiukkaset tarttuvat keräimen teippipintoihin, joista pölyhiukkaset tunnistetaan ja lasketaan mikroskooppia apuna käyttäen. Lisäksi siitepölyä kerättiin idätyskokeita varten Graseby-Andersen hiukkaskeräjäjällä, jossa imumootri imee ilmaa ja hiukkasia suodattimeen jatkuvasti. Suodattimelta siitepölyt huuhoitiin B&K kasvualustalle ja idätettiin n. 5 vrk +25 asteessa. Samanaikaisesti tutkimusmetsiköissä tehtiin fenologisia havaintoja eli tarkkailtiin emikukkien avautumista ja pölyn irtoamista hedekukinnoista. Fenologiaseurantaan valittiin jokaisesta metsiköstä n. 45 puuta ja jokaisesta puusta n. 20 emi- sekä hedekukintoa, yhteensä kolmessa tutkimusmetsikössä seurattiin 10 765 emikukintoa ja 6 786 hedekukintoa.



Kuva 1. Itämiskykyisen siitepölyn määrän vaihtelu vuosina 1997–2000.

Itämiskykyistä männyn siitepölyä todettiin olevan ilmassa ennen pölyn irtoamista paikallisista hedekukinnoista. Ulkopuolista männyn siitepölyä oli joka vuosi jokaisella tutkimusalueella, paitsi Kevoilla vuonna 1999 (kuva 1.). Vuodesta ja alueesta riippuen tutkimusalueen ulkopuolista pölyä oli ilmassa

1–4 vrk ennen paikallisen pölyn leviämistä.

Ulkopuolisen itämiskykyisen männyn siitepölyn määrä oli 2,3 % kaikesta ilmassa kerätystä männyn siitepölystä. Siitepölykauden alkupäivinä itävää ulkopuolista siitepölyä oli ilmassa pienempiä määriä kuin myöhemmin joilloin myös paikallinen pöly läh-

ti liikkeelle. Poikkeuksena oli vuosi 2000, jolloin Korpilahdella mitattiin ilmasta enemmän ulkopuolista pölyä kuin myöhemmin paikallista. Vuosina 1997, 1999 ja 2000 Korpilahden hedekukinnoista irtosi siitepölyä samaan aikaan kun Rovaniemellä havaittiin ilmassa männyn itävää siitepölyä.

Seuratuista emikukinnoista 7,5 % avautui 2–5 vrk ennen paikallisten hedekukkien pölyn irtoamista. Vuonna 1997 emi- ja hedekukinta alkoi yhtäaikaan Korpilahdella ja Rovaniemellä.

Ajotuksellisesti on mahdollista, että ensimmäisinä aukeavat männyn emikukat pölyttyvät useiden satojen kilometrien päästä lähtöisin olevalla siitepölyllä mahdollistaen geenivirran. Geenivirtauksen varmentamiseksi tarvittaisiin tarkempia geneettisiä tutkimuksia, jotka nykyisillä huonosti erottelevilla geenimarkkereilla on mahdotonta. Sen sijaan erot taimien kylmänkestävyydessä voivat olla merkki etelämmästä tulleen siitepölyn vaikutuksesta. Sopeutumisessa muuttuviin olosuhteisiin on toisaalta tärkeää, että metsäpopulaatioista löytyy tarpeeksi geeettistä monimuotoisuutta.

■ FM Saira Varis & FM Anne Pakkanen, Metla, Vantaan toimipaikka; Dr. Aina Galofré, Tarragona, Spain; MTT, FT Pertti Pulkkinen, Metla, Haapastensyrjän toimipaikka
Sähköposti: saila.varis@metla.fi

Sini Eräjää, Panu Halme, Janne S. Kotiaho, Anni Markkanen ja Tero Toivanen

Lahopuun määrä ja laatu energiapuun korjuualoilla ja tavanomaisilla avohakkuualoilla

Seloste artikkelista: Eräjää, S., Halme, P., Kotiaho, J.S., Markkanen A. & Toivanen, T. 2010. The volume and composition of dead wood on traditional and forest fuel harvested clearcuts. *Silva Fennica* 44(2): 201–211.
<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf442201.pdf>

Metsien uudistamisen yhteydessä päätehakkuualoilta kerätään yhä useammin talteen myös hakkuutähde energiantuotantoa varten. Kasvavan

mielenkiinnon kohteena on myös kantojen nosto tähän tarkoitukseen. Energiapuun korjuun myötä päätehakkuualoilta poistuu lahoppuuta, joka on aiemmin jäänyt hakkuualoille. Lahoppu on niukka resurssi suomalaisissa talousmetsissä ja sen puute ainakin osittainen syy monien metsälajien uhanalaisuuteen. Lahoppu on myös merkittävä ravinteiden lähde hakkuualalle kasvavan uuden puusukupolven kannalta.

Tässä tutkimuksessa mitattiin lahoppuun määrää ja laatua päätehakkuilla, joilta hakkuutähde ja kannot oli korjattu energiapuuksi, sekä tavanomaisilla päätehakkuilla, joille hakkuutähde ja kannot oli jätetty. Tutkimusalueina oli kymmenen energiapuun korjuualaa ja kymmenen tavanomaista päätehakkuuta. Alueet sijaitsivat Keski-Suomessa. Jokaiselta alueelta laskettiin lahoppuun määrä neljältä 100 m² ruudulta, huomioiden kaikki vähintään 2 cm paksut ja vähintään 20 cm pitkät lahoppuun kappaleet.

Ehkä tutkimuksen yllättävin tulos oli lahoppuun suuri kokonaistilavuus sekä energiapuun korjuualoilla että tavanomaisilla päätehakkuualoilla. Lahoppuun kokonaismääräksi mitattiin peräti 42,3 m³/ha aloilla, joilta energiapuuta ei korjattu ja 26,0 m³/ha energiapuun korjuualoilla. Suuria lukemia selittää merkittävältä osin valittu, erityisen tarkka lahoppuun mittaustapa. Jos lahoppu olisi mitattu valtakunnan metsien inventoinnissa käytettävällä menetelmällä (jossa mitataan halkaisijaltaan vähintään kymmensenttiset ja pituudeltaan vähintään 1,3 metrin mittaiset kappaleet), määrät olisivat olleet 15,6 m³/ha tavanomaisilla päätehakkuualoilla ja 13,8 m³/ha energiapuun korjuualoilla. Tuloksesta voidaan vetää johtopäätös, että eri tavoilla mitattuja lahoppumääriä verrattaessa on oltava erityisen varovainen ja että monissa aiemmissä tutkimuksissa uudistusalojen lahoppuun määrä on aliarvioitu.

Toinen huomionarvoinen tulos oli pieniläpimittaisen lahoppuun suurehko määrä. Halkaisijaltaan alle kymmensenttistä lahoppuuta oli tavanomaisilla hakkuilla 9,7 m³/ha ja energiapuun korjuualoilla merkittävästi vähemmän, 5,9 m³/ha. Näin suuri määrä viittaa pieniläpimittaisen lahoppuun muodostavan päätehakkuualoilla merkittävän resurssin. Pieniläpimittaisesta lahoppuusta suuri osa oli oksia, joiden määrä oli tavanomaisilla hakkuilla merkittävästi suurempi kuin energiapuun korjuualoilla (4,0 ja 2,4 m³/ha). Pieniläpimittaisen lahoppuun merkitys

monimuotoisuudelle saattaa korostua silloin, kun lahoppuuta ylipäättään on niukasti. Koska energiapuun korjuun yhteydessä poistuu erityisesti tätä pientä lahoppuuta, tulisi siihen kiinnittää entistä tarkempaa huomiota tutkittaessa hakkuualojen merkitystä lajiston monimuotoisuudelle ja energiapuun korjuun vaikutuksia siihen.

Erityisen suuri vaikutus energiapuun korjuulla oli kantojen määrään sekä niiden osuuteen lahoppuun kokonaismäärästä. Energiapuun korjuualoilla oli 81 % vähemmän hakkuissa syntyneitä kantoja kuin kontrollialoilla. Energiapuun korjuualoilla kannot muodostivat vain 10 % lahoppuusta, kun niiden osuus tavanomaisilla päätehakuilla oli 35 % lahoppuusta. Sekä energiapuun korjuualoilla että tavanomaisilla päätehakuilla maapuurungot muodostivat kuitenkin tilavuudeltaan suurimman yksittäisen lahoppuutyypin (47 % ja 36 % kokonaistilavuudesta). Energiapuun korjuulla ei ollut vaikutusta runkojen määriin tutkituilla aloilla.

Yhteenvedona tutkimuksesta voidaan todeta, että energiapuun korjuu muuttaa ja yksipuolistaa merkittäväällä tavalla päätehakkuiden lahoppuukoostumusta. Erityisesti tämä vaikutus näkyy kannoissa, mutta myös pienikokoisessa lahoppuussa. Koska juuri näitä resursseja on tavanomaisilla päätehakuilla erityisen runsaasti, voi niiden merkitys lajiston monimuotoisuudelle ja uuden puusukupolven kasvulle olla huomattava. Näin ollen aihetta olisi syytä tutkia lisää ennen energiapuun korjuun laajamittaista yleistymistä.

■ Fil. yo Sini Eräjää, FM Panu Halme, Prof. Janne S. Kotiaho, FM Anni Markkanen, FT Tero Toivanen, Bio- ja ympäristötieteiden laitos, Jyväskylän yliopisto
Sähköposti panu.halme@jyu.fi

Ruut Rabinowitsch-Jokinen ja
Ilkka Vanha-Majamaa

Hakkuun, laikkumätästykseen sekä kantojen korjuun välittömät vaikutukset lahoppuustoon uudistettavissa kuusikoissa

Seloste artikkelista: Rabinowitsch-Jokinen, R. & Vanha-Majamaa, I. 2010. Immediate effects of logging, mounding and removal of logging residues and stumps on coarse woody debris in managed boreal Norway spruce stands. *Silva Fennica* 44(1): 51–62.

<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf441051.pdf>

Suomen energiapuun käyttötavoitteiden kasvaessa kantojen korjuu uudistusaloilla on yleistynyt nopeasti. Kantojen korjuun ympäristövaikutuksia on kuitenkin tutkittu vasta niukasti. Tutkimuksesamme selvitimme kahden energiapuuta tuottavan kuusikon uudistamisketjun välittömiä vaikutuksia lahoppuiden tilavuuteen sekä niiden laholuokka- ja puulajisuhteisiin. Uudistamisketjun 1 toimenpiteet: avohakkuu ja hakkuutähteiden korjuu sekä laikkumätästys; uudistamisketjun 2 toimenpiteet: avohakkuu ja hakkuutähteiden korjuu sekä laikkumätästys yhdessä kantojen korjuun kanssa.

Lahoppuun vähenemistä ja sen laadun yksipuolistamista pidetään yhtenä vakavimmista metsätalouden aiheuttamista muutoksista metsälajistolle. Noin viidesosa Suomen ~21 000 metsälajista on riippuvaisia lahoppuusta ja lahoppuun väheneminen on yksi uhanalaistumiseen tai silmälläpitoon johtaneista syistä 419 lajille Suomessa. Lahoppu myös tasapainottaa ekosysteemin ravinnekiertoa, on tärkeä humuksen lähde, lisää maan vedenpidätyskykyä ja vähentää sen happamuutta. Vaikka energiapuun korjuun tarkoituksena on kerätä puuainesta, on tärkeää tietää missä määrin nämä toimenpiteet vaikuttavat ekosysteemin toimintaan ja mm. jäljelle jäävään lahoppuuston määrään ja laatuun.

Tutkimus toteutettiin Metsämiesten säätiön rahoituksella ja UPM Kymmene Oyj:n tutkimusaloilla. UPM Kymmene Oy myös vastasi toimenpiteiden toteutuksesta. Tutkimusmetsiksi valittiin Etelä-Suo-

Taulukko 1. Toimenpiteistä aiheutuneet lahoppuuston keskitilavuuksien muutokset ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$, %). Inventointihetket: hakkuuta ennen (He), hakkuun ja hakkuutähteiden korjuun jälkeen (HHKj) sekä laikkumätästykseen (LMj) tai laikkumätästykseen sekä kantojen korjuun jälkeen (LMKKj). Lahoppuusto sisältää myös hakkuussa syntyneen uuden lahoppuun.

Toimenpideketju Muutos ^a	1 & 2		1		2	
	He-HHKj (n=10) $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	%	HHKj-LMj (n=5) $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	%	HHKj-LMKKj (n=5) $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$	%
pystylahoppu	-2,82**	-29,91	-1,36*	-20,12	0,24	3,76
maalahoppu	0,35	5,03	0,68	8,63	0,85	12,37
pysty- ja maalahoppu	-2,47***	-15,05	-0,68	-4,69	1,08	8,09
kannot	7,87***	346,27	0,05	0,47	-5,77***	-57,56
lahoppu yhteensä	5,41***	28,90	-0,64	-2,56	-4,67**	-20,00

Asteriskit havainnollistavat tilastollista merkitsevyyttä lineaarisessa sekamallissa, jossa verrattiin koalojen lahoppuuston keskitilavuuksia ($p \leq 0,05 = *$, $p \leq 0,01 = **$, $p \leq 0,001 = ***$).

^a Väliviiva merkitsee kyseisten inventointihetkien välistä erotusta.

mesta Längelmäen lähistöltä kuusivaltaisia tuoreen ja lehtomaisen kankaan uudistuskypsiä talousmetsiä. Tutkimuksessa oli mukana kymmenen yhden hehtaarin kokoista koelaa. Koaloilta inventoitiin olemassa olleet ja hakkuun seurauksena syntyneet pysty- ja maalahoppuut sekä kannot. Maa- ja pystylahoppuun tuli olla läpimitaltaan rinnankorkeudelta ja kantojen vastaavasti kaatokorkeudelta vähintään 10 cm. Inventoinnit tehtiin vuonna 2005 kolme kertaa: ensimmäinen ennen toimenpiteitä, toinen avohakkuun ja hakkuutähteiden korjuun jälkeen sekä kolmas joko laikkumätästykseen tai vaihtoehtoisesti laikkumätästykseen ja kantojen korjuun jälkeen riippuen toimenpideketjusta. Silloisten ja nykyisten metsänhoito- ja energiapuun korjuusuositusten mukaisesti lahoppuusto pyritään säilyttämään kohteilla edellä mainituista toimenpiteistä huolimatta.

Havaitsimme, että avohakkuu ja hakkuutähteiden korjuu vähensivät muun paitsi kantolahoppuun tilavuutta (taulukko 1). Pystylahoppuun sekä yhdistetyn pysty- ja maalahoppuun tilavuudet vähenivät merkittävästi. Vähenemiseen olivat syynä työkoneiden aiheuttamat vauriot sekä lahoppuun joutuminen korjatun energiapuun joukkoon. Myös kantojen korjuu yhdessä laikkumätästykseen kanssa vähensi merkittävästi lahoppuuston kokonaistilavuutta, kun taas pelkällä laikkumätästyksellä ei ollut merkittävää vaikutusta lahoppuuston tilavuuteen (taulukko 1).

Keskilahot ja pitkälle lahonneet lahoppuut tuhoutuivat toimenpiteissä herkimmin.

Maalahoppuun tilavuudet lisääntyivät hieman toimenpiteiden seurauksena johtuen suurimmaksi osaksi pystylahoppuiden vaurioitumisesta ja kaatumisesta maalahoppuiksi. Myös hakkuussa syntyneillä tähteillä oli tähän pieni vaikutus. Lisäksi kantojen korjuun ja sen yhteydessä tehdyn laikkumätästykseen aiheuttamiin pysty- ja maalahoppuun määriin vaikutti muutamien uusien pystylahoppuiden syntyminen elävien säästöpuiden kuoleamisen seurauksena.

Tuloksemme osoittavat, että hakkuu, hakkuutähteiden korjuu ja laikkumätästys eivät vähentäneet lahoppuun kokonaistilavuutta. Lahoppuun laatu kuitenkin muuttui siten, että ennen hakkuuta metsässä ollut maa- ja pystylahoppu vähentyi kun taas tuoreet kannot lisääntyivät. Kantojen korjuu ja sen yhteydessä tehty laikkumätästys puolestaan vähensi merkittävästi alalle jäävää lahoppuuston kokonaistilavuutta, vaikka on mahdollista, että tutkimuksemme kantojen korjuu toteutettiin keskimääräistä varovaisemmin.

■ MMM Ruut Rabinowitsch-Jokinen, Metsähallitus, Etelä-Suomen Luontopalvelut; FM Ilkka Vanha-Majamaa, Metla, Vantaan toimipaikka
Sähköposti ilkka.vanha-majamaa@metla.fi

Ville Kankaanhuhta, Timo Saksa ja Heikki Smolander

Laatutyön vaikutus metsänuudistamistoimintaan Etelä-Suomen yksityismailla

Seloste artikkelista: Kankaanhuhta, V., Saksa, T. & Smolander, H. 2010. The effect of quality management on forest regeneration activities in privately-owned forests in southern Finland. *Silva Fennica* 44(2): 341–361.

<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf442341.pdf>

Maastomittauksiin perustuvaa metsänuudistamisen laadun hallintajärjestelmää kehitettiin yhdessä n. 40 metsänhoitoyhdistyksen kanssa kuuden eteläsuomalaisen metsäkeskuksen alueella vuosina 2000–2006. Menetelmäkehityksen pohjana käytettiin laatujohtamisen yleistä teoriapohjaa sekä UPM-Kymmenen omissa metsissä saatuja hyviä kokemuksia laadun hallinnasta. Metsänhoitoyhdistysten kanssa tehty laatutyö sisälsi kesän maastoinventoinnit ja niihin perustuvan analysoidun palautteen, yhteenvedon toimintatavoista sekä kehittämistarpeiden kartoituksen. Neljän metsäkeskuksen alueella järjestettiin laatujohtamiseen ja paikallisiin metsänuudistamisen erityiskysymyksiin liittyvää koulutusta metsäammattilaisille. Tämän lisäksi yksitoista metsänhoitoyhdistystä osallistui inventointeihin kahdesti, ja osan kanssa järjestettiin vielä paikallisia laadun kehittämistilaisuuksia.

Tässä tutkimuksessa selvitettiin laatutyön ja sen yhteydessä annetun mittauksiin perustuvan palautteen vaikutusta metsänuudistamistoimintaan. Ensin selvitettiin, mitä kehittämiskohteita toimijat olivat löytäneet uudistamistoiminnastaan saamansa palautteen perusteella ja millaisia tavoitteita he olivat asettaneet. Toiseksi selvitettiin, mihin laadun hallinnan työkaluihin, koulutukseen sekä uusiin tuotantoresursseihin, kuten esim. muokkauskalustoon, oli suunnattu resursseja. Kolmanneksi selvitettiin, miten metsänuudistamistoiminta uudistamisketjun eri vaiheissa oli muuttunut. Tämän lisäksi selvitettiin, mikä oli toimijoiden kiinnostus osallistua laatutyöhön jatkossa.

Laatutyön vaikutusta metsänuudistamistoimintaan tutkittiin kahden postikyselyn avulla, joista ensimmäinen tehtiin keväällä 2006 ja toinen, kattavuudeltaan laajempi, syksyllä 2007. Postikyselyt lähetettiin kuuden metsänuudistamisen laadun hallinnassa mukana olleen metsäkeskuksen metsänhoitoyhdistysten toiminnanjohtajille ja kaikille toimihenkilöille, jotka olivat metsänuudistamisen kanssa tekemisissä. Laadun hallintaan osallistumattomien yhdistysten vastaava henkilöstö toimi nimellisenä vertailuryhmänä. Syksyn 2007 kyselyn vastaukset kattoivat VMI9:n kunnittaisten metsävaratietojen perusteella 71 % kuuden metsäkeskuksen kuntien metsätalouden pinta-alasta. Pääkysymysten keskimääräinen vastausprosentti oli 52. Aineiston analysoinnissa käytettiin tavanomaisia tilastollisia tunnuslukuja, kuten otoskeskiarvoja; t-, F- ja χ^2 -testejä; sekä lineaarisia sekamalleja.

Laatutyöhön osallistuneissa yhdistyksissä kaivurimuokkaajien määrä oli lisääntynyt 16 % enemmän verrattuna vertailuryhmään. Lisäksi kaivurimuokkaajat olivat hankkineet 23 % enemmän uutta välineistöä, esim. kauhoja. Laikkumätästyksen käyttö kuusen uudistamisessa oli yleistynyt eniten. Laatutyöhön osallistuneet metsäammattilaiset käyttivät 11 % enemmän puolitoistavuotiaita ja sitä vanhempia kuusen taimia vertailuryhmään verrattuna, ja heidän alaisuudessaan toimivat istuttajat olivat osallistuneet 14 % useammin istutuskoulutukseen. Istutus- ja muokkaustiheyden omavalvontamittauksia oli otettu käyttöön 10 % vertailuryhmää enemmän. Omavalvontamittausten hyödyntäminen korostui etenkin niissä laatutyöhön osallistuneissa yhdistyksissä, joiden istuttajat olivat osallistuneet istutuskoulutukseen. Laatutyöhön osallistuneet toimijat olivat vertailuryhmäänsä kiinnostuneempia saamaan laadun hallinnan inventoinneista palautetta toimintansa kehittämiseen myös jatkossa.

Laatujohtamisen peruseriaatteiden havaittiin toimivan hyvin metsänuudistamisen laatutyössä. Metsäammattilaisten asettamat tavoitteet toteutuivat josakin määrin, mutta etenkin koko uudistamisketjun suunnittelussa oli puutteita. Tämä kävi ilmi etenkin kasvupaikkaolosuhteiden tarkistukseen ja menetelmävalintoihin liittyen. Metsänuudistamispalvelujen laadun kehittämisessä tarve toimijakohtaiselle tavoitteenasettelulle, systemaattisesti mitatun palautteen saamiselle sekä jatkuvalla kehitystyöllä ei ole

vähentynyt. Maastomittauksiin pohjautuvat laadun hallintajärjestelmät voivatkin aidosti täydentää nykyisiä ja kehitteillä olevia metsäsuunnittelujärjestelmiä.

■ MMM Ville Kankaanhuhta, MMT Timo Saksa ja Prof. Heikki Smolander, Metla, Suomenjoen toimipaikka
Sähköposti: ville.kankaanhuhta@metla.fi

Minna Rätty ja Annika Kangas

Globaalin regressiomallin lokalisointi homogeenisissä ositteissa

Seloste artikkelista: Segmentation of model localization sub-areas by Getis statistics. *Silva Fennica* 44(2): 303–317.
<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf442303.pdf>

Yli koko tutkimusalueen sovitettua puustoa kuvaavaa regressiomallia kutsutaan globaaliksi malliksi. Vaikka tämä malli olisi kokonaisuutena harhaton, voi aineistosta löytyä pienempiä alueita, joilla jäännösvirheet poikkeavat suurinpiirtein saman verran ja samaan suuntaan nollassa. Tällaisella homogeenisellä alueella globaali malli antaa harhaiset tulokset, mutta harha voidaan poistaa lokalisoidamalla eli paikallistamalla malli kyseiselle alueelle. Tässä tutkimuksessa testattiin tällaisten homogeenisten alueiden löytämistä ja rajaamista segmentointialgoritmeilla.

Aineistossa oli 19 175 valtakunnan metsien 9. inventoinnissa mitattua mäntykoepuuta Suomen 11 eteläisimmän metsäkeskuksen alueelta. Kaikista puista oli mitattu rinnankorkeusläpimitan (d) lisäksi pituus (h). Tutkimuksessa käytettiin puun muotokorkeuden muunnoksen (f) regressiomallia:

$$f = \frac{v}{d^2} = \beta_0 + \beta_1 d + \beta_2 d^2 + \beta_3 \ln(BA) + \alpha_1 XC + \alpha_2 XC^2 + \alpha_3 XC \cdot YC + \alpha_4 YC + \alpha_5 YC^2 + \alpha_6 RDIST + \varepsilon$$

missä mitatun rinnankorkeusläpimitan lisäksi olivat puun tilavuus (v), koealan kokonaispohjapinta-ala (BA) ja puun sijaintia kuvaavat muuttujat (XC , YC ja $RDIST$ = etäisyys rannikosta) sekä jäännösvirhe (ε), joka on todellisen muotokorkeuden ja regressiomallilla ennustetun arvon erotus.

Alueiden löytämisessä oli apumuuttujana globaalin mallin jäännösvirheille laskettu Getisin paikallinen indeksi (G_i^*), joka kuvaa globaalin jäännösvirheen suuruutta laskentapuun kohdalla ja sen ympäristössä ts. harhan suuruutta ja alueen homogeenisuutta laskentapisteen naapurustossa. Jos piste ja sen ympäristö poikkeavat nollassa, myös indeksin arvo poikkeaa nollassa. Indeksien etumerkki kertoo poikkeaman suunnan. Tämä muuttuja laskettiin kaikille aineiston puille.

Työn ensimmäisessä vaiheessa tutkimusalue jaettiin mahdollisimman yhtenäisiin alueisiin, segmentteihin. Segmentointia varten pistemuotoiset aineistosarjat interpoloitiin rastereiksi. Näin ollen saatiin neljä erilaista ”kuvaa”, joille segmentoinnit voitiin toteuttaa: 1) jäännösvirheet, ja 2) G_i^* -indeksi yksin, sekä 3) jäännösvirheet ja G_i^* -indeksi yhdessä ilman painotusta, ja 4) painottaen kuvan varianssin käänteisarvolla. Itse segmentointi tehtiin eCognition Pro 4.0 -ohjelmalla (*Definiens Imaging*), josta löytyy Multiresolution segmentation -algoritmi kuvien segmentointiin. Muuttamalla algoritmin parametrien arvoja saatiin aikaiseksi useita eri segmentteja jokaiselle kuvalle.

Eri segmentteja näille neljälle kuvalle tuli yhteensä 30, joissa tutkimusalue jakautui neljästä 366:een alueeseen. Seuraavassa vaiheessa alkuperäinen regressiomalli sovitettiin eli lokalisointiin näihin segmentteihin. Lokalisoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä ainoastaan saman globaalin regressiomallin uudelleen sovittamista alueen aineistoon. Malliin ei tuoda uusia muuttujia, vaan haetaan alkuperäisistä muuttujista sopivin yhdistelmä. Lokalisoinnin onnistumista mitattiin keskineliövirheen neliöjuurella ($RMSE = \text{root mean square error}$) ja sen muutoksilla.

Lokalisoidamalla alueiden RMSE:t laskivat keskimäärin 3,6% verrattuna tilanteeseen ko. alueilla ennen lokalisointia. Toisaalta osalla alueista lokalisointi nosti RMSE:tä, joten näille lokalisointi ei sopinut. Eräänä tavoitteena oli erotettujen alueiden spatiaalinen homogeenisuus, jolloin lokalisoidussa

mallissa ei ole yhtään spatiaalista eli puiden sijaintia kuvaavaa muuttujaa jäljellä. Tällaisia täysin homogeenisia alueita oli 56 % kaikista alueista.

Kun segmentointeja verrattiin kokonaisuudessaan toisiinsa, ne segmentoinnit, joissa G_i^* -indeksi oli mukana, saivat matalampia RMSE:itä kuin pelkästään residuaaleihin pohjautuvat segmentoinnit. Tällaista menetelmää voisi olla mahdollista soveltaa niin, että eroteltaisiin ne alueet, joilla lokalisoinnilla saavutetaan hyötyjä, eli homogeeniset ympäristöstä erottuvat alueet, ja sovellettaisiin jäljelle jääneillä alueilla globaalia mallia sellaisenaan.

■ MMM, DI Minna Rätty ja prof. Annika Kangas, Helsingin yliopisto, Metsätieteiden laitos
Sähköposti: minna.s.ratty@helsinki.fi

Tuomo Nurminen, Heikki Korpunen ja Jori Uusitalo

Toimintokohtaisen kustannuslaskennan soveltaminen puunkorjuu- ja puunkuljetusoperaatioissa

Seloste artikkelista: Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2009. Applying the activity-based costing to cut-to-length timber harvesting and trucking. *Silva Fennica* 43(5): 847–870.
<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf43/sf435847.pdf>

Lopputuotteiden tuote- ja laatuvaatimukset pyritään nykyisin ottamaan yhä tarkemmin huomioon jo puunkorjuuvaiheessa. Tämä on johtanut siihen, että samasta leimikosta katkottujen puutavaralajien määrä on lisääntynyt voimakkaasti viimeisen vuosikymmenen aikana. Puutavaralajien lisääntynyt määrä hidastaa sekä puunkorjuuta että kuljetusta. Työhön kuluvan ajanmenekin pohjalta voidaan lähestyä myös kustannuksia. Mitä enemmän jonkin puutavaralajin tekemiseen ja kuljettamiseen kuluu aikaa, sen suurempi osuus tuotantokustannuksistaikin pitäisi kohdistaa tälle puutavaralajille. Puhutaan nk. aiheuttamisperiaatteesta.

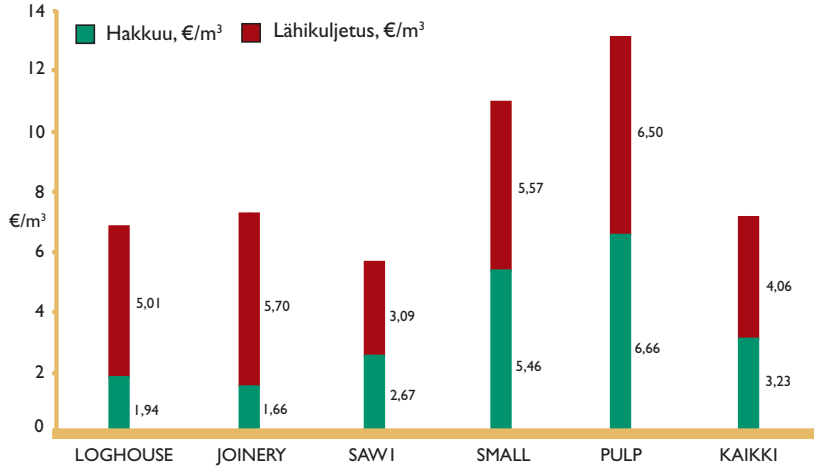
Olemme kehittäneet uuden toimintokohtaisen kustannuslaskentamenetelmän (englanniksi *Activity-Based Costing*), jolla puunkorjuun ja puunkuljetuksen kustannukset kohdennetaan kullekin puutavaralajille.

Laskentamallissa puunhankinta jaetaan kolmeen pääprosessiin: hakkuuseen, lähikuljetukseen ja kaukokuljetukseen, joille jokaiselle muodostetaan toimintokohtainen yksikkökustannus. Kukin pääprosessi jaetaan edelleen toimintoihin eli aktiviteetteihin. Kustannukset kohdistetaan toiminnollisiin yksittäiselle pölkylle, rungon osalle, rungolle, kuljetettavalle kuormalle (tai kuorman osalle) tai leimikosta hakattavalle puutavaraerälle aiheuttamisperiaatteen mukaan. Lopullinen yksikkökustannus kullekin prosessille saadaan, kun toimintokohtaiset kustannukset lasketaan yhteen. Leimikon yksittäiselle puutavaraerälle saadaan koko puunhankintaoperaation yksikkökustannus summaamalla yhteen pääprosessien aiheuttamat yksikkökustannukset.

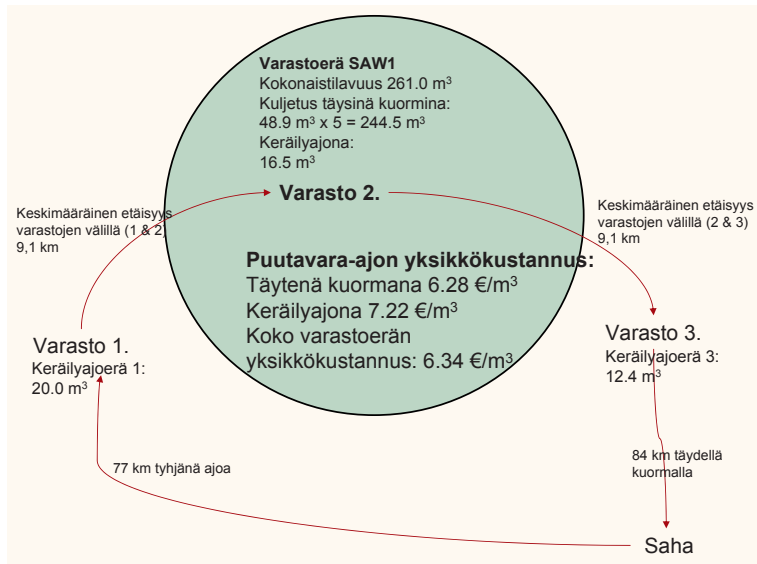
Puunhankintaoperaatioissa käytettävät resurssit voidaan luetella seuraavasti: henkilöstö, koneet, kulutustarvikkeet sekä rakennukset. Hakkuussa ja lähikuljetuksessa kustannukset jaetaan kiinteisiin kustannuksiin, muuttuviin kustannuksiin sekä henkilöstökustannuksiin. Näiden pohjalta voidaan rakentaa kullekin työkoneelle ja työmaalle perinteisen tuntikustannuslaskelman pohjalta tuntikustannus (€/h). Puunkuljetusoperaatioissa sen sijaan puutavara-auton kustannukset jaetaan matkariippuviin sekä aikariippuviin kustannuksiin. Sen lisäksi voidaan vielä erikseen jaotella kuormaimen kustannukset.

Hakkuuprosessissa on kymmenen ja lähikuljetuksessa on seitsemän eri toimintoa. Toiminnot ovat jaoteltu samalla tavalla kuin useimmin käytetyissä aika- ja tuotostutkimuksissa. Tämä mahdollistaa sen, että kunkin toiminnon ajanmenekin estimointiin voidaan käyttää sopivaa ajanmenekki- tai tuotosfunktiota. Toimintokohtainen kustannuslaskenta antaa puutavaralajeittain hyvin erilaisen kustannusrakenteen kuin perinteinen kustannuslaskenta, jossa kustannukset jaetaan ainoastaan kiinteisiin ja muuttuviin kustannuksiin ja kaikki kustannukset kohdistetaan puutavaralajeittain prosessissa tuotettujen puutavaralajikohtaisten tilavuuksien suhteen.

Esimerkkileimikkomme on tyypillinen 3 hehtaarin suuruinen, mäntyvaltainen avohakkuuleimikko.



Kuva 1. Toimintokohtaisen laskennan tuloksena saadut puutavaralajittaiset hakkuun – ja lähikuljetuksen yksikkökustannukset.



Kuva 2. Periaate, jolla täysien kuormien ja keräilyajon kuormien kustannukset lasketaan yhteen.

Leimikko on todellisuudessa hakattu kesällä 2004. Hakkuukoneilta tallennettiin puunkorjuun yhteydessä sähköinen runkotiedosto (Stm-file) jokaisesta hakatusta rungosta. Leimikosta hakattiin mäntyä 411 m³, joka vastasi 64 prosenttia leimikon koko puustosta. Mäntyrunkojen keskikoko oli 0,454 m³. Mäntyrungot katkottiin viideksi puutavaralajiksi, sahatukiksi (SAWI), kolmeksi erikoistukiksi

(JOINERY, LOGHOUSE, SMALL) ja kuitupuuksi. Ajanmenekit ja tehotuntituottavuusluvut estimoitiin ajanmenekifunktioita hyväksi käyttäen. Hakkuukoneen tuntikustannukseksi saatiin vuoden 2005 kustannustasoa käyttäen 84,15 €/h ja kuormatraktorin 61,10 €/h.

Kuvan 1 yksittäiset palkit kuvaavat toimintokohtaisen kustannuslaskennan avulla muodostettuja

kustannuksia, joita voidaan verrata kuvan oikeassa reunassa olevaan viimeiseen palkkiin (KAIKKI), joka tässä kuvaa kaikkien puutavaralajien keskiarvoa eli perinteisellä kustannuslaskennalla muodostettua kustannusta.

Autokuljetuksen kustannuslaskentamalli ottaa huomioon yhdestä leimikosta ajettut täydet puutavaralajikuormat sekä nk. keräilyajon, jossa täysi kuorma yhtä puutavaralajia kerätään useammasta kuin yhdestä leimikosta. Esimerkkilaskelma perustuu tyyppilliseen 7-akseliseen puutavara-autoon, jolla on oma kuormain ja jonka kapasiteetti on 48,9 m³ tuoretta puutavaraa. Sahatukista 244,5 m³ voidaan laskennallisesti kuljettaa täytenä kuormana ja loput 16,5 m³ osana keräilyajoa. Kuva 2 kertoo periaatteen kuinka kustannus täysistä kuormista ja keräilyajoerästä kohdistetaan koko leimikosta saatavalle puutavaralajierälle.

Kehittämämme laskentamalli antaa tasoltaan hyvin uskottavia tuloksia verrattuna käytännössä urakoitsijoille maksettaviin korvauksiin verrattuna. Menetelmä soveltuu metsäyhtiöiden sekä puunkorjuu- ja puunkuljetusyrittäjien oman sisäisen kustannuslaskennan työkaluksi. Se antaa myös erinomaisen pohjan tutkijoille ja käytännön operaattoreille, kun kehitetään puun toimitusketjun hallinta- ja optimointimenetelmiä. Kun tulevaisuudessa joudutaan yhä useammin ottamaan kantaa siihen, mihin jalostusprosessiin rungon eri osat katkotaan, on ensiarvoisen tärkeää osata laskea koko jalostusprosessin kustannukset oikealla tavalla.

■ MH Tuomo Nurminen, Metsätoimisto Tuomo Nurminen, Korpilahti; MMM Heikki Korpunen ja MMT Jori Uusitalo, Metla, Parkanon toimipaikka
Sähköposti: jori.uusitalo@metla.fi

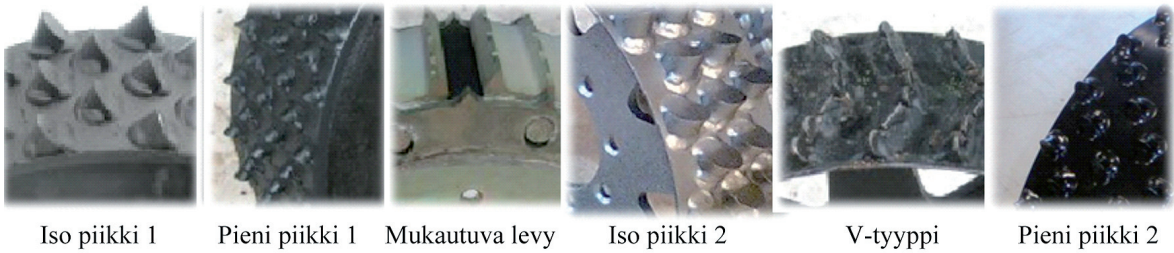
Yrjö Nuutinen, Kari Väätäinen,
Antti Asikainen, Robert Prinz ja
Jaakko Heinonen

Hakkuukoneen syöttörullien vaikutus rungon prosessoinnin nopeuteen, polttoaineenkulutukseen sekä tukkipuuvaurioihin

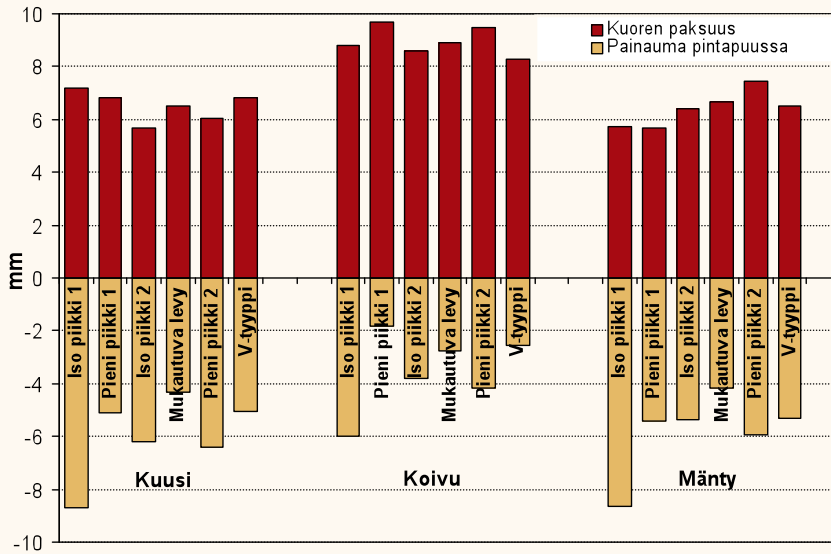
Seloste artikkelista: Operational efficiency and damage to sawlogs by feed rollers of the harvester head. *Silva Fennica* 44(1): 121–139.

<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf441121.pdf>

Hakkuukonehakuun aikaisia puutavaran vaurioita ovat rungon tyven repeäminen kaatosahauksessa, pöllien päiden halkeaminen katkotasahauksessa, karsintaterien aiheuttama rungon kuoriutumisen ja puuaineksen vuoleutuminen sekä syöttörullien kuvioinnin aiheuttamat painaumat pintapuussa. Syöttörullatyyppien vaikutus tukkipölkkyjen pintapuun vaurioitumiseen tuli ajankohtaiseksi jo 1970-luvulla, kun teräksiset piikkirullat tulivat laajemmin käyttöön hakkuulaitteisiin. Syöttörullien tekemät painaumat pintapuussa, ollessaan siellä riittävän syvällä, voivat huonontaa suoraan sahapuun laatua ja vähentää sen saantoa. Suurempi haitta syöttörullien vaurioista on vanerin sorvipölkkyjen latvaosissa varsinkin koivulla, jolloin piikkipainaumat voivat alentaa merkittävästi viulun laatua. Rullien painaumat heikentävät myös kuusihiokkeen laatua, koska ne kuivattavat tienvarsivarastolla kuitupuupölkkyjen pintaosaa ennen tehdasprosesseja. Kuoriutumisen ja pintapuun rikkoutumisen vuoksi myös puutavaran sinistymisriski kasvaa. Sinistymishaitat tulevat korostumaan, mikäli leutojen talvien yleistyminen jatkuu tulevina vuosina. Syöttörullan tyyppi vaikuttaa hakkuun tuottavuuteen ja polttoaineenkulutukseen, sillä esimerkiksi päätehakuilla rungon syötön osuus hakkuun tehoajasta keskikokoisella rungolla on noin 15%. *Tutkimuksessa selvitettiin hakkuukoneen syöttörullatyyppien kuvioinnin painaumia tukkipuiden pintapuuhun sekä syöttörullatyyppien vaikutusta rungon prosessoinnin nopeuteen ja polttoaineenkulutukseen.*



Kuva 1. Tutkimuksessa testatut syöttörullat. Rullien nimet ovat keksittyjä rullatyyppejä havainnollistavia nimiä.



Kuva 2. Syöttörullien painamat pintapuussa sekä kuoren paksuudet puulajeittain kuorittumattomilla tutkimuspölkkyillä.

Tutkimuksessa verrattiin kuutta erilaista teräkstä syöttörullaa: *pieni piikki 1*, *pieni piikki 2*, *iso piikki 1*, *iso piikki 2*, *v-tyyppi* ja *mukautuva levy* (kuva 1). Maastomittaukset tehtiin maaliskuussa 2007 neljällä eri päätehakuuleimikolla, jotka sijaitsivat Sarvingin kylässä noin 50 km Joensuusta itään. Eri rullatyyppien kuviointien tekemät painaumat määritettiin puulajeittain (kuusi, mänty, koivu). Painaumat mitattiin elektronisella työntömitalla tukkipuupölkkyjen pintapuusta kolmesta eri kohdasta: tyvestä, välistä ja latvasta. Samoista kohdista mitattiin myös kuoren paksuus. Yhteensä 139 pölkystä mitattiin 1416 painauma. Hakkuukoneelle tallentuneesta aineistosta analysoitiin noin 4 500:n kuusen, männyn ja koivun tukkirungon prosessoinnin aikainen polttoaineenkulutus ja tehosyöttöaika. Niitä verrattiin

puulajeittain (kuusi, mänty ja koivu) kolmessa eri kokoluokassa, joiden rungon käyttöosan tilavuudet olivat: Pienet rungot 0,05 m³, keskikokoiset rungot 0,35 m³ ja suuret rungot 0,65 m³.

Tutkimuksen tulosten mukaan perinteisten piikkirullien syöttönopeudet olivat suurempia ja polttoaineenkulutukset pienempiä kuin muilla rullatyypeillä; mutta samalla niiden aiheuttamat painaumat tukkirunkojen pintapuuhun olivat rullatyypeistä suurimmat. Mukautuva levy oli nopein ja sen polttoaineenkulutus oli alhaisin kaikkien puulajien pienillä rungoilla. Mukautuva levy jätti myös pienemmät painaumat kuin muut rullatyyppit. Koivun paksumpi kuori suoja puuainesta syöttörullien kuvioinnin painaumilta niiden ollessa selvästi pienempiä kuin kuusella ja männnyllä (kuva 2). Tulosten perusteella

voidaan olettaa, että syöttörullien jättämien painaumien syvyys riippuu samanaikaisesti rullien kuvioinnin muodosta ja pituudesta sekä voimasta, jolla rulla puristuu runkoa vasten.

Keskikokoisilla rungoilla suurimman ja pienimmän runkokohtaisen syöttöajan välinen erotus eri syöttörullatyypin välillä oli 6–19 % mikä vaikuttaisi hakkuun kokonaistehoaikaan 1–3 %. Polttoaineenkulutuksessa vastaavat erot olivat 7–15 % ja yleensä nopeimmat rullat kuluttivat vähiten polttoainetta. Suomen vuoden 2006 50,8 miljoonan kuutiometrin hakkuupoistumalle 15 % ero syöttörullien polttoaineenkulutuksessa vastaisi tämän tutkimuksen aineistolla laskettuna noin 2,4 miljoonan litran polttoainemäärää. Tutkimus osoitti, että prosessoitavan rungon koko sekä puulaji vaikuttaa eri syöttörullatyypin polttoaineenkulutukseen ja syöttönopeuteen ja sitä kautta hakkuun kokonaistuottavuuteen. Tämä tulisi ottaa huomioon valittaessa sopivia rullatyyppejä hakkuukohteille.

■ MMMYrjö Nuutinen, MMM Kari Väättäinen, Professori Antti Asikainen, MMM Robert Prinz ja VTM Jaakko Heinonen, Metla, Joensuun toimipaikka.
Sähköposti yrjo.nuutinen@metla.fi

Tomi Tulokas

Tukinpyöriyksen tarkkuuden mittaamenetelmä ja parantaminen sahausksessa

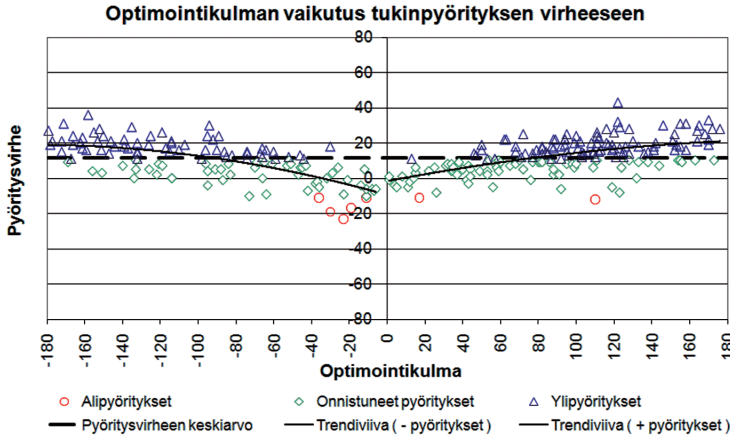
Seloste artikkelista: Tulokas, T. & Tannous, J. 2010. Research method and improvement of log rotation in sawmills. *Silva Fennica* 44(1): 141–154.

<http://www.metla.fi/silvafennica/full/sf44/sf441141.pdf>

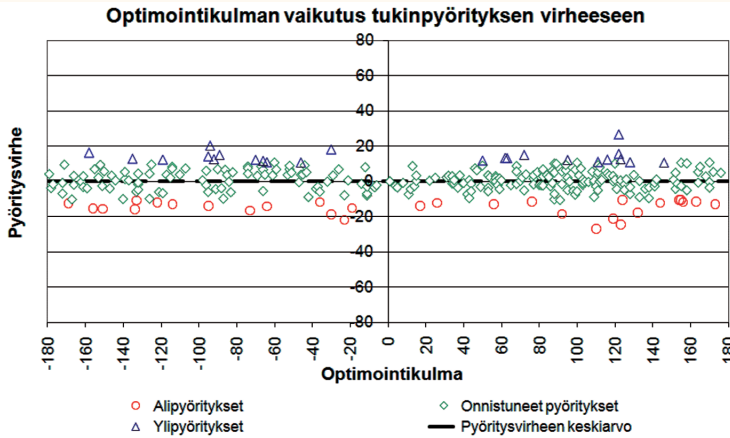
Lappeenrannan teknillisen yliopiston Sahatekniikan laboratorio tutki vuosien 2003–2005 aikana 14 suomalaisella sahauslaitteella tukinpyöriyksen tarkkuutta. Tutkimukset keskittyivät ns. automaattiseen tukinpyöriykseen, jossa syöttökuljetin ja tukinpyörittäjä keskittävät ja asemoivat tukin 3D mittauksella määrätyn pyöriyksen mukaisesti parhaaseen sahausasentoon.

Automaattipyöriyksen onnistumista määrittäessä verrattiin keskenään tukkimittarin optimoimia ja pyöriyksessä toteutuneita kulma-arvoja, jotka mitattiin videokuvasta otetuista pysäytys-kuvista (ennen ja jälkeen pyöriyksen). Tukkimittarin optimoinnin ja pyöriyksessä toteutuneen kulma-arvon erotuksen perusteella saatiin yksittäiselle pyöriykselle laskettua pyöriyksen virhe δ sekä tarkasteltavalle tukkijoukolle tukinpyöriyksen onnistumista kuvaavat tunnusluvut, kuten pyöriyksen keskiarvo (\bar{X}) ja pyöriyksen keskihajonta (s). Keskiarvo kuvaa pyöriyksen tarkkuutta ja hajonta sitä, kuinka tiiviissä paketissa yksittäiset pyöriykset ovat keskiarvon ympärillä. Lisäksi tukkijoukolle laskettiin hyväksytyille alueelle tapahtuneiden pyöriysten osuus. Hyväksytyllä alueella tarkoitetaan onnistuneita pyöriyksiä ($-10^\circ \leq \delta \leq +10^\circ$), jolloin pyöriys poikkeaa tavoitearvosta korkeintaan 10° .

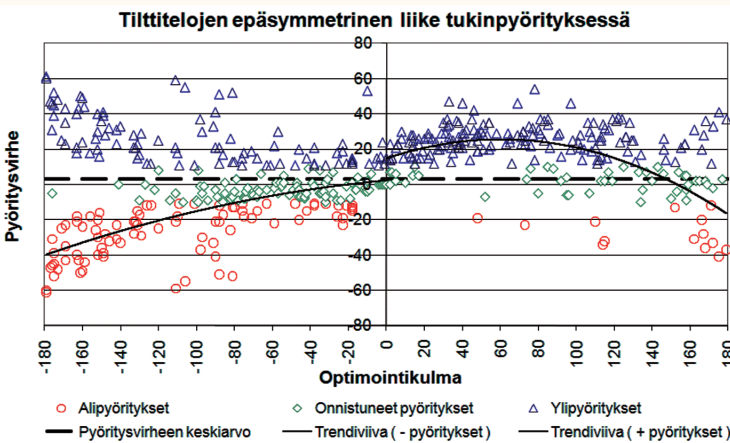
Tukinpyöriyksen tarkkuus vaihteli melkoisesti eri sahojen välillä. Automaattipyöriyksen pyöriyksen virheen keskiarvo vaihteli välillä $-23,6^\circ \dots +11,4^\circ$. Eli niin keskimääräistä yli- kuin alipyöriytystä oli havaittavissa. Pyöriyksen virheen keskihajonta oli välillä $4,4^\circ \dots 22,9^\circ$. Tutkimuksissa havaittiin usean sahan osalta se, että tukinpyöriyksessä syntynyt pyöriyksen virhe oli ainakin jollain lailla riippuvainen tukki-



Kuva 1. Optimointikulman vaikutus pyöritystulokseen Sahalla 2. Tukinpyörikyset virheen keskiarvo (\bar{x}) oli +11,4° eli pyörikyset menivät keskimäärin +11,4° yli. Pyöritysvirheen keskihajonta (s) oli 10,5°. Onnistuneiden pyörikyseten osuus oli 42,6%.



Kuva 2. Korjattu tukinpyörikysetulos Sahalla 2. Tukinpyörikyset virheen keskiarvo (\bar{x}) oli -0,1°. Pyöritysvirheen keskihajonta (s) oli 8,0°. Onnistuneiden pyörikyseten osuus oli 81,0%.



Kuva 3. Sahalla 13 myötäpäivään tapahtuneet pyörikyset menivät keskimäärin 17,0° yli, kun vastapäivään tapahtuneet pyörikyset jäivät keskimäärin 13,1° vajaiksi. Pyöritysvirheen keskihajonta-arvot olivat suuret (17,0° myötäpäivään ja vastapäivään 17,8°). Tilittelojen epätarkka liike kasvatti pyöritysvirheen kokonaiskeskihajonta-arvon (myötä- ja vastapäivään tapahtuneet pyörikyset yhdessä tarkastellen) erittäin suureksi (22,9°).

mittarin optimointikulman suuruudesta. Tyypillinen ilmiö oli se, että mitä suurempi tavoiteltu tukin pyörityskulma oli, sitä suuremmalla todennäköisyydellä pyörityksessä syntyi virhettä ja sitä suurempi syntynyt virhe oli (kuva 1).

Tukinpyörityslaitteiston ohjauksen epätarkkuutta voitiin arvioida simuloimalla tutkimuksessa saatuja pyöritystuloksia. Simuloinnissa laskettiin esimerkiksi Sahoilla 1 ja 2 mitatuille tukkierille kuvitteelliset korjaukset tukkimittarin laskemaan pyörittäjän mekaniikan ohjaukseen. Kuvassa 2 on esitetty Sahan 2 tukkierälle simuloitu pyöritystulos, jossa yksittäiset mitatut (toteutuneet) pyöritysmäärät on korjattu korjauksertoimilla, jotka on laskettu kuvassa 1 esiintyvien lineaaristen kuvaajien yhtälöiden avulla.

Simuloituissa tuloksissa molemmilla sahoilla pyörityskulman hajonta pieneni selvästi. Sahan 1 tapauksessa pyörityskulman hajonta pieneni 40,9 prosenttia eli 14,9 asteesta 8,8 asteeseen. Samalla onnistuneiden pyöritysten suhteellinen osuus kasvoi 4,0-kertaiseksi eli 20,1 prosentista 79,4 prosenttiin. Sahan 2 tapauksessa pyörityskulman hajonta pieneni 23,8 prosenttia eli 10,5 asteesta 8,0 asteeseen. Samalla onnistuneiden pyöritysten suhteellinen osuus kasvoi 1,9-kertaiseksi eli 42,6 prosentista 81,0 prosenttiin. Nykytutkimuksen mukaan nelisahauksessa 2,5 asteen lasku pyöritysvirheen keskijahonnassa (10,5 asteesta 8,5 asteeseen) tarkoittaa 0,5 %:n kasvua arvosuunnassa. Esimerkiksi 10 M€:n liikevaihdolla tämä tarkoittaa sahalle 50 000 €:n vuotuista lisätuloa.

Pyöritysvirheen ja optimointikulman välinen riippuvuus osoittaa, ettei pyörityksen onnistuminen ole aina kiinni pyörittäjän mekaniikan toiminnasta. Ratkaisu tukinpyörityksen laadun parantamiseen voi siis olla myös pyörittäjän mekaniikan ohjauksessa silloin, kun pyöritysvirheen ja optimointikulman selvä riippuvuussuhde on havaittavissa. Tukinpyörityksen tarkkuutta on syytä valvoa, sillä silmämääräisesti on vaikea tunnistaa pyörökö tukki prosessissa 20° vaiko 45° saatikka sitten havainnoida tukinpyöritysmekaniikan epänormaali, mutta systemaattinen liike. Kuvassa 3 on esitetty tukinpyörityksen tutkimustulos Sahalta 13, kun yksöistilttipyörittäjän oikea tilttirulla ei asemoitunut oikein pyöritysten jälkeen.

Muutamilla sahoilla on käytössä järjestelmiä, jotka käyttävät hyväksi sahauksen ensimmäisen vaiheen jälkeen sijoitetun 2D tai 3D pelkkamittarin

mittausaineistoa, joilla voidaan valvoa tukinpyörityksen onnistumista vertaamalla tukin optimiasemaa ja pyörityksen jälkeistä tukin asemaa toisiinsa. Tällaisen mittausjärjestelmän hinta on noin 55 000 € ja keskikokoisella sahalla laitteisto saattaa maksaa itsensä takaisin jo alle kahdessa vuodessa, jos esimerkiksi artikkelissa esitetty tukinpyörityksen optimointikulman ja pyöritysvirheen välinen riippuvuussuhde on havaittavissa.

■ DI Tomi Tulokas, Edinburgh Napier University,
United Kingdom
Sähköposti ttulokas@jcallander.co.uk

Tuomas Aakala

Puuston kuolleisuus ja lahoppuun dynamiikka vanhoissa boreaalisissa metsissä

Tutkimuseloste väitöskirjasta: Aakala, T. 2010. Tree mortality and deadwood dynamics in late-successional boreal forests. *Dissertationes Forestales* 100. 41 s. + liitt.
<http://www.metla.fi/dissertationes/df100.htm>

Kuollut puu on olennainen osa vanhojen luonnonmetsien rakennetta. Sillä on merkittävä rooli monissa ekosysteemien toiminnoissa, kuten energian ja ravinteiden kierrossa, biodiversiteetin ylläpidossa, hiilen varastoinnissa, ja taimettumisalustana metsien uudistumisessa. Kuolleen puun dynamiikkaan, ts. sen määrään, laatuun ja näiden muutoksiin vaikuttaa puiden kuolleisuus ja lahoaminen. Kuolleisuus määrittelee kuinka paljon ja minkälaista kuollutta puuta metsissä syntyy, ja lahoaminen puolestaan sen kuinka nopeasti tämä kuollut puu poistuu metsäekosysteemistä, ja kuinka nopeasti sen ominaisuudet tänä aikana muuttuvat. Metsissä kunakin ajanhetkenä oleva lahoppu, ja sen laatu ovat siten seurausta näiden kahden prosessin yhteisvaikutuksesta.

Kuolleen puun sisällyttämistä metsänhoitoon on perusteltu ennen kaikkea sen merkityksellä biodiversiteetille. Luonnontilaisten metsien lahoppumäärien ajatellaan tarjoavan vertailukohdan arvioitaessa rakenteellisia eroja talousmetsien ja luonnontilaisten metsien välillä. Kuolleen puun kohdalla ongelmana kuitenkin on, että sen dynamiikka luonnontilaisissa metsissä tunnetaan monilla alueilla huonosti, johtuen tiedon puutteesta liittyen sekä puuston kuolleisuuteen ja sen ajalliseen vaihteluun, että kuolleen puun lahoamisnopeuteen. Tästä syystä lahoppu on usein mielletty muuttumattomaksi ekosysteemin osaksi, huolimatta sen dynaamisesta luonteesta.

Tässä väitöskirjatyössä tutkittiin puuston kuolleisuutta ja sen seurauksena syntyvän lahoppuun määriä ja laatua sekä näiden muutosta lahoamisen seurauksena. Tutkimuskohteina olivat kuolleet pystypuut Itä-Kanadan mustakuusen (*Picea mariana*) ja palsamipihdan (*Abies balsamea*) vallitsemissa metsissä, sekä kuolleet pysty- ja maapuut pohjois-eurooppalaisissa kuusen (*Picea abies*) vallitsemissa metsissä Pallas-Ylläksen kansallispuistossa, ja Luoteis-Venäjällä Murmanskin ja Arkangelin alueilla. Tutkimusta varten elävä ja kuollut puusto mitattiin viideltä 1,6 hehtaarin koealalta kultakin tutkimusalueelta, sekä Itä-Kanadassa kolmelta eri metsikötyypiltä (yht. 30 koealaa, 48 ha). Kuolleet puut luokiteltiin laholuokkiin, ja kustakin luokasta kerättiin näytteitä puuaineen tiheyden ja kuolinvuosien määrittämiseksi. Kuolinvuodet määritettiin puun vuosilustoista dendrokronologian keinoin. Näistä tuloksista puuaineen tiheyden muutokset mahdollistavat kuolleeseen puuhun sitoutuneen biomassan tarkastelun, ja kuolinvuosien ajoitustulosten perusteella pystyttiin rekonstruoimaan puuston aiempi kuolleisuus. Ajoitustulosten pohjalta myös kehitettiin kuolleen puun lahoamista kuvaavat matriisimallit. Mallit kuvaavat kuolleen puun vuosittaista siirtymistodennäköisyyttä laholuokasta seuraavaan, tai pystyynkuolleen puun todennäköisyyttä kaatua. Kuolinvuosien ajoittaminen on mahdollista kuolleista puusta, joissa puun pintaosien lustot ovat ehjiä. Tämän takia lahoamistarkastelu rajoittui tuoreisiin ja keskiasteisesti lahonneisiin puihin; pitkälle lahonneita puita, joiden lustot eivät lahoamisen myötä enää olleet erotettavissa ei voitu ajoittaa.

Kaikille tutkimusalueille oli yhteistä pienialainen, jatkuva puuston kuolleisuus. Tämän ns. taustakuol-

leisuuden vuosittainen vaihtelu oli tutkimusalueilla 0,3 ja 1,2 % välillä. Tämän lisäksi euroopanpuoleisten tutkimusalueiden osalta Murmanskin ja Arkangelin alueilla havaittiin korkeamman kuolleisuuden jaksoja, joissa muutaman vuoden aikana oli kuollut huomattava osa puustosta. Tämä oli erityisen merkittävää Arkangelin alueella, jossa vuosien 1999–2004 välillä kuoli n. 21 % puustosta. Kuolleisuusjakso oli todennäköisesti seurausta kuivuudesta, ja sitä seuranneista kirjanpainajan (*Ips typographus*) aiheuttamista tuhoista. Huomionarvoista on, että kuivuutta ei ole yleensä pidetty merkittävänä laajempana tuhonaiheuttajana Euroopan borealisissa metsissä. Murmanskin alueella puuston kohonnut kuolleisuus oli seurausta metsikön luontaisesta kehityksestä; 317 vuotta aiemmin sattuneen metsäpalon jälkeen syntynyt lähes tasaikäisen kuusikon puusto lähestyi maksimi-ikänsä, jonka myötä puut olivat heikentyneitä ja siten alttiita ulkoisille häiriöille, kuten myrskytuulille. Itä-Kanadan tutkimusalueen metsät kärsivät tunnetusti ajoittaisista hyönteisten massaesiintymisistä, joista edellinen epidemia oli tutkimusalueella voimakkaimmillaan vuosina 1978–79. Tämän jälkeen kuolleisuus oli varsinkin mustakuusen vallitsemissa metsissä melko tasaista. Palsamipihdan vallitsemissa metsissä vaihtelua oli enemmän, mutta kuolleisuus pysyi kuitenkin verraten matalalla tasolla. Vaikka edellinen hyönteisten massaesiintyminen olikin liian kaukana ajassa, jotta sen vaikutukset olisivat suoraan näkyneet puuston kuolleisuuden rekonstruoinneissa, oli se näkyvissä metsiköiden rakenteessa.

Yleisesti lahoppuun määrä, ja sen osuus kokonaispuustosta noudatteli näitä eroja tutkimusalueiden häiriöhistoriassa. Alueiden eroista huolimatta, ja nimenomaan jatkuvan pienialaisen kuolleisuuden seurauksena kuollutta puuta oli kuitenkin kaikilla tutkimusalueilla eriasteisesti lahonneena. Euroopan puoleisilla tutkimusalueilla lahoppuuston osuus metsiköiden kokonaispuustosta oli 20–53 %, ja Itä-Kanadassa kuolleen pystypuun osuus oli 15–27 % puustosta. Kuollut puu oli lisäksi pitkäikäinen rakenteellinen ekosysteemin osa. Arkangelin tutkimusalueellakin, jossa lahoaminen oli kaikkein nopeinta, kuollut puu pysyi tuoreissa ja keskiasteisesti lahonneissa laholuokissa keskimäärin 18 vuotta. Hitaimmin lahoava Murmanskin tutkimusalueen puusto viipyi näissä luokissa keskimäärin 32 vuotta.

Tässä vaiheessa puuaineen tiheydestä huomattavan suuri osa oli vielä jäljellä. Tämän perusteella kuollut puuaines toimii hiilen varastona vielä selvästi pidemmän aikaa.

Tutkimuksessa kehitetyt lahoamismallit mahdollistavat lahopuun kehityksen ennustamisen, ja tietoa lahopuun dynamiikasta voidaan hyödyntää talousmetsien luonnonhoidon suunnittelussa. Tulosten perusteella vanhojen metsien lahopuun määrä voi vaihdella huomattavasti, eikä kuolleen puun pitäminen muuttumattomana rakenteellisena osana metsäekosysteemiä siten ole useinkaan perusteltua. Kuolleisuuden ajallinen vaihtelu, jatkuva pienialainen kuolleisuus, sekä lahoamisnopeus yhdessä määrittelevät lahopuun saatavuuden siitä riippuvaiselle lajistolle, sekä sen merkityksen hiilen varastona boreaalisisissa havumetsissä.

■ MMT Tuomas Aakala, Helsingin yliopisto,
Metsätieteiden laitos
Sähköposti: tuomas.aakala@helsinki.fi

Jari Vauhkonen

Puutunnusten estimointi ilma-laserkeilauksella: kolmiulotteisen pisteaineiston laskennalliseen geometriaan perustuvia menetelmiä

Seloste väitöskirjasta: Vauhkonen, J. 2010. Estimating single-tree attributes by airborne laser scanning: methods based on computational geometry of the 3-D point data. *Dissertationes Forestales* 104. 44 s. + liitt.
<http://www.metla.fi/dissertationes/df104.htm>

Laserkeilauksen merkitys metsätaloudellisissa sovelluksissa kasvaa jatkuvasti. Esimerkiksi metsäkeskukset ovat aloittaneet puuston kuvioitaiset arvioinnit laseraineistojen aluepohjaiseen tulkintaan perustuvilla menetelmillä. Vaihtoehtona on tulkita aineistoa puukohtaisesti, mikä edellyttää

aluepohjaista tulkintaa tiheämpää laseraineistoa. Yksityiskohtaisen kaukokartoitusmateriaalin käytöstä puustotulkinnassa on runsaasti tuoretta tutkimustietoa (ks. esim. Metsätieteen aikakauskirjan teemanumero 4/2009), mutta puukohtaisessa tulkinnassa on tiettyjä perusongelmia, jotka hankaloittavat sen käytännön hyödyntämistä. Väitöskirjatutkimuksessa keskityttiin puulajin sekä rungon läpimitan ja tilavuuden johtamiseen puukohtaisesta laseraineistosta, joilta osin menetelmäkehitys on aiemmin todettu riittämättömäksi.

Tutkimuksessa sovellettiin pisteaineistojen laskennallista geometriaa kiinnostuksen kohteena olevien tunnusten estimoimiseksi. Menetelmän perusperiaatteena on tuottaa puukohtaisesta laseraineistosta kolmiulotteisia latvumalleja ns. alfa-muotoihin (engl. *alpha shape*) perustuvilla tekniikoilla. Latvumalleista johdettujen muuttujien sekä erilaisten luokitus- ja mallinnusmenetelmien avulla päätellään kiinnostuksen kohteena olevat puutunnukset. Väitöskirja koostuu viidestä osatutkimuksesta, joissa esitellään kehitettyjä tunnuksia ja mallinnusmenetelmiä sekä arvioidaan niiden tarkkuutta.

Ensimmäisessä ja toisessa osatutkimuksessa alfa-muotoihin perustuvaa lähestymistapaa testattiin hyvin tiheässä (40 pulssia / m²) ja tarkasti rajatussa aineistossa. Kehitettyjen latvusmuuttujien havaittiin useimmiten tuovan lisätietoa puulajin ja läpimitan ennustamiseen, ja erityisesti havupuiden puulajin tunnistaminen onnistui hyvin latvuksen muotoa ja rakennetta kuvaavien parametrien avulla. Kolmannessa osatutkimuksessa testattiin kahta ns. lähimmän naapurin menetelmää ja näiden menetelmien parametrisointeja kaikkien kiinnostuksen kohteena olevien puustotunnusten tuottamiseksi samanaikaisesti. Tutkimuksessa käytettiin puoliautomaattista latvusten rajausten menetelmää ja tulosten validointiin oli erillinen n. 1 200 puuta käsittävä aineisto. Tässä aineistossa saavutettu puulajiluokituksen tarkkuus oli parhaimmillaan n. 80 % ja rungon tilavuuden estimaattien suhteellinen keskineliövirhe luokkaa 30 % puutasolla arvioitaessa. Puulajiluokituksessa on toisaalla raportoitu hieman korkeampia tarkkuuksia, mutta erityisesti rungon tilavuuden osalta saavutettuja tarkkuuksia lienee perusteltua pitää jonkinlaisena ylärajana laseraineistoon (6–8 pulssia/m²) ja paikalliseen maastoaineistoon perustuvassa yksinpuintulkinnassa.

Neljännän osatutkimuksen tavoitteena oli arvioida kehitettyjen menetelmien toimintaa aluetason inventoinnissa. Tutkimuksessa laseraineistolta automaattisesti generoiduille latvussegmenteille tuotettiin puustotunnukset edellisissä osatutkimuksissa esitetyillä menetelmillä. Menetelmien soveltaminen automaattisesti koko puustoon osoittautui ongelmalliseksi latvusten rajausrvirheiden ja puutason tunnusten epätarkkuuden takia, joista jälkimmäiseen vaikutti osaltaan referenssi- ja validointiaineiston erilainen rajausrmenetelmä. Viidennessä osatutkimuksessa esiteltiin uusia menetelmiä valtapuuston latvusrajaestimaattien tuottamiseksi puukohtaiselta laseraineistolta. Menetelmäkehityksen lähtökohtana oli tuottaa latvusrajaestimaatteja pistepilvien ominaisuuksien perusteella eli ilman erillistä maastoaineistoa. Muun muassa estimoitua puun pituutta selittäjänä käyttäneet paikalliset mallit toimivat tutkimuksessa kehitettyjä menetelmiä tarkemmin, mutta myös kehitetyillä menetelmillä saavutettiin kohtalaisia tuloksia ja esim. 20–30 % suhteellinen keskineliövirhe mäntypuustoissa.

Väitöskirjatyössä esitetyt menetelmät arvioivat puiden latvusten kokoa ja rakennetta, joten menetelmien toiminnan kannalta oleellista on latvuksen tarkka rajaaminen. Parhaisiin tuloksiin päästiin vartuneissa, harvahkoissa puustoissa ja puoliautomaattisilla rajausrmenetelmillä. Yksittäisten puiden latvusinformaation täysimittainen hyödyntäminen on siten mahdollista vain tietäntyyppisissä metsiköissä, tulkinta on herkkää lähtötietojen virheille ja varsinaisten puutunnusten tuottaminen esim. lähimmän naapurin menetelmillä vaatii tarkasti paikannetun maastoreferenssiaineiston. Koska myös aluepohjaisella tulkinnalla voidaan tuottaa puutason tietoa esim. puuston kokojakaumien muodossa, yksinpuintulkinnassa lienee järkevää keskittyä täydentämään aluepohjaisen tulkinnan tietosisältöä tarkoilla latvusmittauksilla koko puuston biomassan ennustamisen sijaan. Jatkotutkimuksissa laseraineistojen yksinpuintulkinnan mahdollisia käyttökohteita sekä hyötyjä ja kustannuksia tulee selvittää tarkemmin suhteessa muihin inventointimenetelmiin.

■ MMT Jari Vauhkonen, Itä-Suomen yliopisto, luonnon- ja metsätieteiden tiedekunta, metsätieteiden osasto.
Sähköposti jari.vauhkonen@uef.fi.