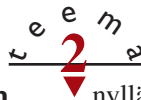


Erkki Verkasalo, Sanna Hautamäki ja Harri Kilpeläinen

Mänty- ja kuusisahatavaran laatujakaumat ja sahatukin laatu Suomessa ja Luoteis-Venäjällä



Raaka-aineen alkuperä ja puutuotteiden laatu

Puuraaka-aineen alueelliset laatuero ja soveltuvuus ovat jatkuva keskustelunaihe sahatuotteiden osuudessa, jatkojalostuksessa ja asiakkaiden piirissä. Kaikilla osapuolilla tuntuu olevan omat käytännön kokemuksiinsa tai arveluihinsa perustuvat käsityksensä asiasta, mutta harvat perustelevat kantaansa tutkitulla tiedolla. Vielä harvempi katsoo asiaa erityisesti jatkojalostajan tai loppukäyttäjän näkökulmista, vaan puhuu useimmiten lähinnä tukkien koosta ja ulkonäöstä.

Sahatavaran alkuperäalueilla on merkitystä myös kansainvälisessä kaupassa, koska ostajat haluavat sekä varmistua raaka-aineen kestävä kehityksen mukaisesta taustasta että suhteuttaa raaka-aine- ja tuoteominaisuuksia omien valmistusprosessiensa, tuotevalikoimiensa ja asiakkaidensa vaatimuksiin. Laatueroilla ja niistä johtuen myös arvoeroilla on merkitystä erilaisten puutuotteiden viennin ja tuonnin edellytysten kannalta, sekä kilpailuympäristöön asemoitumisessa että tuote- ja asiakasryhmiin suuntautumisessa, niin markkinoinnin suunnittelun kuin hinnanmuodostuksen kautta. Suomelle kaupalliset näkökulmat ovat ajankohtaisia, kun Venäjän orastava jäsenyys Maailman kauppajärjestössä (WTO) on johtamassa raakapuun lisäksi myös puutuotteiden tullimuurien madaltumiseen.

Puutuotteiden visuaalista laatua arvostetaan näkyviin jäävissä puusepäntuotteissa, varsinkin män-

nyllä, mutta joissakin tuoteryhmissä ja eräillä markkina-alueilla myös kuusella. Rakennustuotteissa kuusi on yleisempi puulaji kuin mänty, mutta tärkeimpiä ominaisuuksia ovat puulajista riippumatta lujuus ja jäykkyys, lisäksi mitta- ja muotopysyvyys ja säänkesto. Rakennuspuulle voitaisiin saada lisähintaa erityisesti huippulajilla laaduilla, jos ne pystyttäisiin erottamaan sahatavarasumasta luotettavasti käytännön lajittelussa ja myös lajittelustandardit tukisivat niiden erittelyä puutuote-kaupassa. Laatuero korostavat siis raaka-aineen ja tuotteiden lajittelun tarvetta ja sen tuomia mahdollisuuksia lisäarvoihin puunhankinnan ja tuotteiden valmistuksen eri vaiheissa.

Metsäntutkimuslaitoksen (Metla) Joensuun toimipaikassa on tutkittu suomalaisen ja luoteisvenäläisen sahatavaran laatueroja ja lajittelukriteereitä ja taustalla olevia tukkien ja puuaineen ominaisuuksia eri alueilta peräisin olleen aineiston perusteella. Ensimmäiset tutkimukset alueellisista laatueroista, niiden syistä ja merkityksestä tehtiin 2000-luvun puolivälissä puutieteen ja kansainvälisen metsätalouden tutkijoiden voimin, yhteistyössä VTT:n Combigrade-lujuuslajitteluprojektin ja suomalaisten puutuoteyritysten kanssa. Tutkimuksissa todettiin olennaisia eroja sahatavaran visuaalisen ja lujuuslaadun jakaumissa alueiden ja varsinkin männyllä myös maiden välillä. Myöhemmin tutkimuksia suunnattiin sahatavaran visuaalisen ja lujuusluokajakajakauman ennustamiseen tukeista, sahatavarasta tai molemmista tehtävissä olevien mittauksen perus-

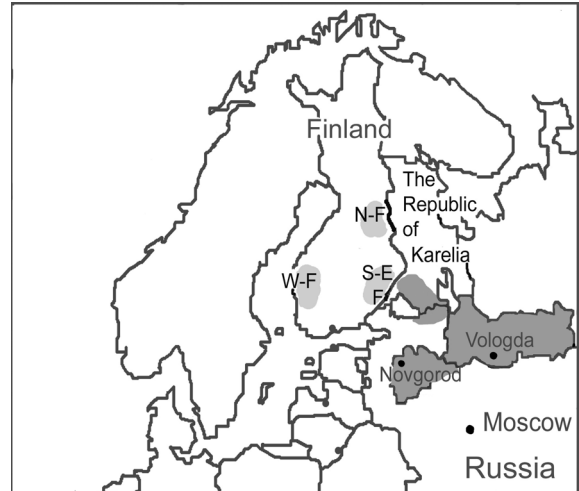
teella, ja sen analysoimiseen ilmeneekö alueellisia laatueroja myös näiden tekijöiden huomioon ottamisen jälkeen.

Tutkimuksia viiden osa-alueen aineistoilla ja puuntutkimuksen, tuotetestauksen ja mallinnuksen menetelmillä

Metla ja VTT keräsivät yhteisen tukki-, sahatavara- ja puunäyteaineiston Suomen kolmen suuralueen ja Venäjän kahden lähialueen kuudesta ja männystä talvella 2005/2006 (kuva 1). Aineistot saatiin otannalla suomalaisille sahoille hankituista tukkieristä, yhteensä 1 162 kuusitukkaa ja 1 107 mäntytukkaa ja vähintään 44 tukkia per alue ja tukin läpimittaluokka (5 kpl). Suomalaisen tukkien alkuperä pystyttiin määrittämään leimikon, mutta venäläisten tukkien alkuperä vain junakuljetusten lähtöaseman tarkkuudella. Aineistoja voidaan pitää laajoina, mutta venäläisten leimikoiden alkuperän epätarkkuudet ja puutavaran mahdollinen lajittelu ennen toimituksia suomalaisille tehtaille merkitsevät tiettyä epävarmuutta tulosten yleistettävyydessä.

Sahoilla tukeista tehtiin tarvittavat mittaukset ja laadunmääritykset, ja niiden päistä otettiin kiekkonäytteet vuosilustorakenteen ja puuaineen kuivausoiretiheyden mittaukseen ja sydän- ja reaktiopuun määrän määrittämiseen. Tukit sahattiin ja kuivattiin vientikosteuteen (16–22 %). Sahaussasetteet olivat yksinkertaisia todellisista kaupallisista aseteista ja niillä tähdättiin tukin kasvavan läpimittaluokan mukaan seuraaviin sydäntavaradimensioihin (mm): 38×100, 50×100, 50×150, 63×200, 44×200 (neljä kappaletta tukista). Kunkin tukin ytimen vastakkaisen puolten saheet jaettiin tasasuhtein rinnakkaisaineistoiksi rakennustuotteiden ja puusepäntuotteiden ominaisuuksien tutkimuksiin.

Rakennustuotetutkimusten saheista mitattiin tarkasti laatu- ja vikatiedot, määritettiin rikkovien testauksen efektiiviset alueet ja otettiin vuosilusto- ja tiheysnäytteet. Tämän jälkeen tehtiin rikkovat taivutuskokeet kimmokertoimen ja murtolujuuden määrittämiseksi yleiseurooppalaisen EN 408 -standardin mukaisesti (kuva 2). Saheet myös lujuusluokiteltiin teoreettisesti C-luokituksen vaatimusten mukaisesti, jotka perustuvat EN 338 -standardiin (koneellisen lujuuslajittelun kriteeristö). Puusepäntuotetutki-



Kuva 1. Suomalaisen ja venäläisten tukkiaineistojen alkuperäalueet. Suomalainen mänty ja kuusi: N-F = Kainuu, W-F = Länsi-Suomi, S-E-F = Itä-Suomi. Venäläinen mänty: Novgorod, Vologda. Venäläinen kuusi: The Republic of Karelia ja osin Novgorod = Venäjän Karjala, Vologda. Piirros: Sanna Hautamäki, Metla

musten saheista mitattiin visuaaliset ominaisuudet ja tekniset viat ja tehtiin visuaalisesti laatulajittelu ja lujuuslaatulajittelu pohjoismaisten käytäntöjen mukaisesti (kuva 3).

Tukkien, puuaineen ja sahatavaran ominaisuuksien vaihtelua ja niihin vaikuttavia tekijöitä tarkasteltiin korrelaatioanalyysien, graafisten aineistokuvien ja monimuuttuja-regressioanalyysien avulla. Sahatavaran laatuokkajakaukille laadittiin selitys- ja ennustemallit binäärisin ja multinominaalisin regressioanalyysien avulla kolmella lajittelumenetelmällä toteutettuna.

Männyn laatu parempi Suomessa, kuusella erot pienehköjä

Tukkien puuaineen laadussa oli alueellisia eroja osin kasvukauden pituuden ja kasvupaikkojen laadun, mutta erityisesti suomalaisen ja venäläisen metsänkasvatuksen perinteiden ja metsänhoidon tasoerojen vuoksi. Erot olivat puuaineessa ja puutuotteissa monimutkaisempia ja osin erisuuntaisia kuin mihin tukkien koko ja ulkonäkö viittaisivat.



Kuva 2. Kuusisaheen taivutuskoekimmomoduulin ja taivutusmurtolujuuden määrittämiseksi. Kuva: Antti Lukkarinen, Metla

Tukkien alueelliset laatuerot olivat männyllä ulkoisen arvioinnin mukaan selvästi suuremmat kuin kuusella. Mäntytkit kuten myös kuusitukit olivat Venäjällä yleensä suuremmasta järeydestään (varsinkin väli- ja latvatukit) huolimatta oksikkaampia kuin Suomessa. Suuremmat tukit Venäjällä ilmensivät sekä järempiä tukkipuita että pienempää tukkisaantoa venäläisissä hakkuissa (ns. tukin ulosottoprosentti). Tukkien suoruuslaatu oli Venäjällä varsinkin väli- ja latvatukeilla huonompi kuin muilla alueilla, mutta kuusella keskimääräistä huonompi myös Kainuussa. Männyn tyvitukkien laatu jakauma oli kaikki tekijät huomioon ottaen selvästi paras Itä-Suomessa ja toiseksi paras Länsi-Suomessa, kun taas Kainuun ja Vologdan ja varsinkin Novgorodin tukit olivat selvästi heikkolaatuisempia. Kuusen tyvitukit ja varsinkin muut tukit olivat laadukkaimpia Itä-Suomessa ja muita alueita heikkolaatuisempia Venäjän Karjalassa ja Kainuussa.

Kuusen tukkiaineistossa todettiin kolminkertainen kuorihävikki Venäjän Karjalassa kaikkiin muihin alueisiin verrattuna. Männyllä tämä oli taas selvästi suurin Länsi-Suomessa ja seuraavaksi suurin Vologdassa mutta Novgorodissa hyvin pieni. Suurta kuorihävikkiä pidetään venäläisen puunhankinnan tyypillisenä piirteenä, lukuun ottamatta sydäntalvea. Kuoren säilyminen on tärkeää tukkien hankinnassa, sillä kuori suojaa puutavaraa kuivumiselta,

pintahalkeilulta ja väri- ja lahovioilta ja on tärkeä lämpöenergian lähde sahoille. Suomalaisen tukkihankinnan etuja ovat hyvä pituuksien hallinta, vähäinen varastovikaantuminen ja nopea toimitusketju kannolta käyttöön. Venäjällä tukkien laatuerot ovat käytännön kokemusten ja aikaisempien tutkimusten mukaan suuria toimittajien välillä.

Tutkituista viidestä alueesta tukkipuu oli selvästi hidaskasvuisinta eli tiivissyisintä Kainuussa ja kuusen tukkipuu tämän ohella Vologdassa. Mänty oli kiekkomittausten perusteella leveälustoisempaa (harvasyisempää) Novgorodissa ja Vologdassa (1,9 mm) kuin Itä- ja Länsi-Suomessa (1,7 mm) ja varsinkin Kainuussa (1,4 mm). Puuaineen tiheyteen olennaisesti vaikuttava kesäpuun osuus oli vastoin oletuksia korkein Kainuussa ja alhainen varsinkin Novgorodissa. Kuusi oli leveälustoisinta Itä- ja Länsi-Suomessa (2,3 mm ja 2,1 mm) ja ohutlustoisinta Kainuussa ja Vologdassa (1,5 mm). Kesäpuun osuus oli korkein Itä-Suomessa ja alhaisin Vologdassa ja oletusten vastaisesti Venäjän Karjalassa. Sydänpuuta venäläisessä tukkipuussa on korkean iän vuoksi yleensä enemmän kuin suomalaisessa.



Kuva 3. Kuusisaheiden mittaaminen ja ulkonäköhavaintoihin (visuaalisuuteen) perustuva laatu luokittelu. Kuva: Kari Kannisto, Metla

Tässä aineistossa tukkien sydänpuuosuuden osa-alueittainen vaihtelu oli Suomessa ja Venäjällä männyllä 60–65 % vs. 68–70 % ja kuusella 66–69 % vs. 71–72 %.

Puuaineen oksaisuuserot ilmenivät sahatavarassa ns. oksa-alasummana (KAR-arvo) männyllä samansuuntaisina ja yhtä selvinä mutta kuusella hieman erilaisina kuin mitä oksikkuuserot ilmenivät tukeissa. Mäntysaheet olivat oksaisimpia Itä- ja Länsi-Suomessa ja vähäoksaisimpia Venäjällä ja Kainuussa, ja kuusisaheet oksaisimpia Itä-Suomessa ja vähäoksaisimpia Kainuussa ja Vologdassa. Sahatavara oli Venäjällä suhteellisesti kuivaoksaisempaa ja Suomessa terveoksaisempaa.

Visuaalinen laatu olennainen näkyvissä pinnoissa ja ilmentää myös stabiliteettia ja työstettävyyttä

Mäntysahatavarasta saatiin visuaalisilta ominaisuuksiltaan parhaita rakennuspuusepän- ja huonekalulaatuja (A-lankkuja) selvästi eniten Itä- ja Länsi-Suomessa, noin 35 %, Kainuussakin 25 %, mutta Novgorodissa ja Vologdassa vain 11 % ja 16 %. B-lankut ovat yleisin sydänpuutavaran laatu luokka, ja niiden osuuden alueelliset erot olivat käänteiset A-laatuun nähden. Huonoja laatuja eli C- ja D-lankkuja oli kokonaisuutena vähiten Itä-Suomessa ja sen jälkeen Länsi-Suomessa ja eniten Vologdassa. Sahatavaran laatu jakauma oli Novgorodissa ja myös Vologdassa tasaisempi kuin Suomessa.

Kuusisahatavarasta oli A-laatu eniten Itä-Suomessa ja Vologdassa, kuitenkin vain noin 10 %, ja vähiten Venäjän Karjalassa ja Länsi-Suomessa, 2 %. Valtalaatua B oli eniten Länsi-Suomessa (yli 80 %) ja vähiten Itä-Suomessa ja Vologdassa (65–70 %). Huonoimpia eli C- ja D-laatuja oli myös eniten Itä-Suomessa ja Venäjän Karjalassa. Sydänpuutavaran laatu jakauma oli tasaisin Kainuussa ja äärevin Itä-Suomessa ja Venäjän Karjalassa. Kuusella luokiteltiin myös laudat kolmelta tutkitulta alueelta. Niiden laatu jakauma oli Venäjällä selvästi äärevämpi kuin Suomessa ja sekä parhaita (A1–A4) että huonoimpia laatuja (C) oli enemmän sekä Venäjän Karjalassa että Vologdassa kuin Itä-Suomessa. A-laatu osuus oli kaikilla alueilla vain alle 20 %.

Tiheys ja mekaaniset ominaisuudet ratkaisevat rakennuskäytössä

Mäntysahatavara oli mekaanisilta ominaisuuksiltaan Suomen kaikilla osa-alueilla hieman odottamattomastikin parempaa kuin Venäjällä. Mäntysahatavaran tiheys (kosteussuhde 12 %) vaihteli alueittain välillä 436–495 kg/m³, kimmokerroin välillä 9,2–11,2 GPa ja taivutusmurtolujuus välillä 31,8–46,6 MPa. Tiheys oli männyllä melko matalalla tasolla – yleisarvio on Suomessa noin 505 ± 50 kg/m³. Siten myös suomalaisen männyn lujuus- ja jäykkyysarvot olivat osin jonkin verran matalampia kuin aiemmissa tutkimuksissa, Kainuussa kuitenkin korkeammat kuin Länsi- ja Itä-Suomessa. Tiheys ja kimmokerroin kasvoivat tukkiluokan suuretessa, Suomessa selvemmin kuin Venäjällä, mutta lujuus korkeintaan lievästi.

Kuusisahatavarassa erottuivat osa-alueista Kainuu ja Vologda keskimääräistä korkeammilla ja Itä-Suomi ja Venäjän Karjala keskimääräistä matalammilla arvoilla. Tiheys vaihteli alueittain 420–457 kg/m³, kimmokerroin 10,3–11,2 GPa ja taivutusmurtolujuus 42,0–47,0 MPa. Tiheys oli kuuselle normaalilla tasolla – yleisarvio Suomessa on noin 450 ± 30 kg/m³. Lujuus- ja jäykkyystulokset olivat kuusella melko korkeita. Tiheys ja varsinkin kimmokerroin ja lujuus kasvoivat ytimen viereisestä saheesta seuraavaan saheeseen. Ilmiötä ei tosin näkynyt Venäjällä, todennäköisesti metsien harventamattomuuden ja pitkien kiertoaikojen vuoksi jolloin ytimen lähellä ilmenee yleisesti sydänhalkeamia ja lylypuuta.

Lujuusluokkajakaumat tärkeitä rakennustuotekaupassa

Sahatavaran todellisen lujuuden mukainen jakauma on perusta lujuuslajittelupotentiaalille eli eri lujuusluokkien mahdolliselle saannolle. Riippuu yhtäältä lujuuslajittelumenetelmän suorituskyvystä ja toisaalta markkinoiden tarvitsemista ja eri tasoille hinnoiteltavissa olevien kaupallisten lujuuslaatu-luokkien erittelystä, miten hyvin tämä potentiaali pystytään hyödyntämään.

Sahatavaran koneellisen lujuuslajittelun vaatimuksissa asetetaan lajiteltaville populaatioille minimiarvot karakteristiselle kimmokertoimelle sekä

keskimääräiselle tiheydelle ja taiputusmurtolujuudelle. Sahatavaraerän karakteristinen kimmokerroin tarkoittaa erän sisältämistä saheista hyväksyttävillä laitteilla tehtyihin mittauksiin perustuvaa arvoa, jonka tilastotieteellisen tarkastelun perusteella täyttää vähintään 95 % saheista. Keskimääräisenä tiheytenä ja lujuutena voidaan käyttää sahan pitkän ajan tuotannosta määritettyjä keskilukuja.

Näillä perusteilla laskettuna täytti männyn saheista luokan C30 eli normaalin hyvän lujuuslaadun vaatimukset Kainuussa vajaat 60 %, Länsi- ja Itä-Suomessa noin 55 %, mutta Vologdassa ja Novgorodissa vain runsaat 10 %. Erot olivat suuret Suomen ja Venäjän alueiden välillä myös tavoiteltaessa korkeampien luokkien vaatimuksia: C40-saheita oli Suomessa 20–30 % mutta Venäjällä vain noin 5 % ja C50-vaatimukset täytti saheista Suomessa 6–9 % ja Venäjällä noin 1 %. Alennettaessa lujuusluokan vaatimuksia tasolle C24 eli tavalliselle rakennusahatavaraalle oli hyväksytyjä saheita Suomessa 65–70 % ja Venäjällä noin 35 %.

Kuusen saheista täytti C30-vaatimukset Länsi-Suomessa yli 70 %, Kainuussa ja Vologdassa 65 % ja Itä-Suomessa 60 %, ja Venäjän Karjalassa runsaat 40 %. C40-saheita oli Kainuussa vajaat 30 %, Vologdassa ja Länsi- ja Itä-Suomessa 20–25 % ja Venäjän Karjalassa runsaat 10 %. C50-vaatimukset täytti muilla alueilla 4–8 % saheista, mutta Venäjän Karjalassa vain 2 %. Alennettaessa lujuusluokan vaatimuksia tasolle C24 saatiin Kainuussa ja Länsi-Suomessa ja Vologdassa hyväksytyjä saheita runsaat 80 %, Itä-Suomessa ja Venäjän Karjalassa vastaavasti 70 % ja 65 %.

Tutkimuksista myös perusteita laatulajittelun kehittämiseksi

Testatun lujuuden mukaan huippulujia laatuja olisi siis mahdollista saada hyvin paljon, jos ne voitaisiin erottaa varmasti sahatavaraerästä käytännön lajittelussa ja niistä olisi mahdollista saada lisähintaa rakennustuotemarkkinoilla.

Tukeista, sahatavaraerästä tai molemmista tehtyjen mittausten perusteella laaditut regressiomallit antoivat sahatavaran visuaalisen laatu- ja lujuusluokkajakauman ja lujuusluokkajakauman ennustamisessa männyllä säännöllisesti tarkempia ennusteita kuin kuusella.

Tukkilajilla (tyvitukki vs. muu tukki, laatu- ja lujuusluokka), sahatavaran oksikkuusmuuttujilla ja eräillä lisätunnuksilla voitiin ennustaa oikein visuaalinen NT-laatu- ja lujuusluokka 40–50 prosentissa saheista ja visuaalisesti arvioitu T-lujuusluokka 44–59 prosentissa saheista. Ennusteet paranivat huomattavasti naapuriluokkia yhdistämällä, esimerkiksi NT-luokituksessa tasolle 76–83 % yhdistämällä neljä luokkaa kahdeksi. Alkuperäalueen vaikutus pieneni jakaumien suoraan tasovertailuun nähden, mutta oli merkitsevä varsinkin männyllä.

EN338-standardin C-lujuusluokittelua simuloitujen voitiin ennustaa oikea luokka 53–54 prosentille saheista ilman kimmokertoimen määrittystä ja 75 prosentille saheista kimmokertoimen määrittämisen kanssa, kun käytettävissä olivat sekä tukki- että sahatavaraominaisuuksien mittaukset. C40–C50-saheista voitiin tunnistaa oikein 45–65 % ilman kimmokerrointa ja 85 % kimmokertoimen kanssa. Tarkimmin voitiin tunnistaa C18- ja C30-luokkien saheet. Alkuperäalueen vaikutus lujuusluokkajakaumaan oli merkitsevä enää vain männyllä.

Tulosten muita soveltamismahdollisuuksia

Sahojen ja havuvaneritehtaiden tukkien hankinnan suuntaamisessa alueittain ja jatkojalostajien sahatavaran ostojen suunnittelussa eri toimittajilta voidaan hyödyntää tietoja ja ennusteita odotettavissa olevasta laadusta, kun painotetaan joko visuaalista laatua tai rakenteellista lujuutta ja jäykkyyttä. Kannattavia lopputuoteryhmiä ja tuotevalikoimia voidaan ennakoita ainakin suhteellisesti käytettäessä erilaisia yhdistelmiä eri alueilta peräisin olevista ja eri kokoluokkia edustavista tukkisumista. Puuraaka-aineen laatu- ja lujuusluokkajakauman on myös yksi perustekijä harkittaessa teollisia investointeja.

Sahatavaran lujuuslajittelu tuottaa sahaajalle huomattavaa lisäarvoa kuusella, mutta ei ilmeisesti yhtä paljon männyllä. Nykyaikainen koneellinen ja objektiivinen lujuuslajittelu tuottaa suuremman lisäarvon kuin tehoton ja subjektiivinen visuaalinen lujuuslajittelu. Epätarkat ja tehottomat lajittelumenetelmät, joissa on käytettävä melko suuria varmuusrajoja yksittäisten saheiden lajittelussa, suosivat keskilaatuisia sahatavaraeriä mutta syrjivät runsaasti korkealaatuisia saheita sisältäviä eriä.

Lujuus- ja jäykkyystulokset ilmentävät paitsi sahatavaran myös vaneri- ja kertopuutuotteiden mekaanisia ominaisuuksia. Nämä ovat tärkeitä lähtötietoja puutuotteiden valmistusprosessien optimoinnissa ja rakentamisen sovellusten suunnittelussa.

Kirjallisuutta

- Hautamäki, S., Kilpeläinen, H., Kannisto, K., Wall, T. & Verkasalo, E. 2010. Factors affecting the appearance quality and visual strength grade distributions of Scots pine and Norway spruce sawn timber in Finland and north-western Russia. *Baltic Forestry* 16(2): 217–234.
- Seliverstov, A. 2008. Puun laatututkimuksia Venäjällä. Kirjallisuuskatsaus. Petroskoin valtionyliopisto. Käännös venäjänkielisestä alkuperäisjulkaisusta. 23 s.
- Syunev, V., Sokolov, A., Konovalov, A., Katarov, V., Seliverstov, A., Gerasimov, Y., Karvinen, S. & Välkky, E. 2009. Comparison of wood harvesting methods in the Republic of Karelia. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 120. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2009/mwp120.pdf>.
- Verkasalo, E. & Hautamäki, S. 2011. Log quality and grade distributions of sawnwood from Finland and north-western Russia. Julkaisussa: Välkky, E., Viitanen, J. & Ollonqvist, P. (eds.). Impact of changes in forest and economic policy and the business preconditions in Russia and Finland. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 218: 71–83. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2011/mwp218.pdf>.

■ Prof. Erkki Verkasalo, MMM Sanna Hautamäki ja MMM Harri Kilpeläinen, Metla, Joensuun toimipaikka
Sähköposti erkki.verkasalo@metla.fi