



Pentti Niemistö¹ ja Ville Hallikainen²

Puutason mallit tukin ja ainespuun osuuksille istutettujen rauduskoivujen päätehakuussa

Niemistö P., Hallikainen V. (2021). Puutason mallit tukin ja ainespuun osuuksille istutettujen rauduskoivujen päätehakuussa. Metsätieteen aikakauskirja 2021-10538. Tutkimusartikkeli. 25 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10538>

Tiivistelmä

Istutuskoivuilla runkojen laatu on erilainen kuin luontaisesti syntyneillä koivuilla, mutta istutuskoivujen hakkuukertymien laatuvehennyksen suuruutta ei vielä tunneta. Rauduskoivun (*Betula pendula* Roth) puutavaralajikertymiä tutkittiin kolmella metsämaan ja neljällä peltomaan hakkuu- alalla 44–51 vuoden kuluttua istutuksesta. Todelliset puukohtaiset kertymät saatiin hakkuukone- mittauksesta, ja rungon dimensioihin ja optimaaliseen katkontaan perustuvat teoreettiset kertymät saatiin pystypuiden runkokäyryltä. Runkovikojen, runkomuodon ja katkonnan yhteisvaikutus vaneritukin ja kaiken ainespuun määriin mallitettiin rinnankorkeusläpimitan perusteella erikseen metsä- ja peltomailla. Rungon tukkivähennysprosentti ja ainespuuvähennysprosentti laskettiin vastaavista teoreettisista tilavuusositteista läpimittaluokittain. Peltomailla koivujen laatu oli huonompi ja vaihtelevampi kuin metsämailla. Kookkaiden, rinnankorkeusläpimitaltaan yli 27 cm:n runkojen tukkivähennys oli peltomailla noin 40 % ja metsämailla alle 25 %. Pienemmillä läpimi- toilla runkojen tukkivähennys kasvoi jyrkästi ollen juuri ja juuri tukkipuun läpimitan täyttävillä puilla 80 %. Peltomailla rungot kapenivat tyveltä ylöspäin vähemmän kuin metsämailla, mutta siitä koitua etu tukkisaannossa menetettiin monin kerroin runkovikojen vuoksi. Tukki- vähennyksen perusteella istutuskoivujen laatu on peltomailla hieman huonompi ja metsämailla selvästi parempi verrattuna aikaisemmin tutkittuihin luontaisiin rauduskoivuihin metsämailla. Puusto- tasolle laskettu tukkivähennys oli voimakkaasti harvennetuissa koivikoissa metsämaalla 26 % ja peltomaalla 38 %, kun keskiläpimitta oli 30 cm. Vastaavissa tiheinä kasvaneissa koivikoissa tukkivähennys oli metsämaalla 54 % ja peltomaalla 67 %, kun keskiläpimitta oli 20 cm. Tukki- tuotoksen lisäämiseksi voimakkaat laatuharvennukset ja puuston järeäksi kasvattaminen ovat suositeltavia etenkin peltomailla. Ainespuuvähennys oli metsämaiden pienimmillä kuitupuilla 20 %, suurimmilla kuitupuukokoisilla puilla 10 % ja isoilla tukkipuilla alle 5 %. Runkovikojen vuoksi ainespuuvähennys peltomailla oli metsämaita suurempi pienillä, rinnankorkeudelta alle 16 cm:n läpimittaisilla kuitupuilla ja myös järeillä tukkipuilla. Noin viidennes ainespuuvähen- nyksestä aiheutui kuitupuun katkonnasta 3 metrin tasapituuteen.

Asiasanat ainespuuvähennys; hakkuukertymä; järeys; katkonta; kuitupuu; metsämaa; peltomaa; puun laatu; runkovika; tukkivähennys

Yhteystiedot ¹Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat, Seinäjoki; ²Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat, Rovaniemi

Sähköposti pentti.niemisto@luke.fi

Hyväksytty 23.9.2021

1 Johdanto

Suomessa rauduskoivua (*Betula pendula* Roth) alettiin viljellä istuttamalla 1960-luvun puolivälissä, ja 1970-luvulla istutuskoivikoita perustettiin yhteensä 46 000 ha, joista noin puolet peltomaille ja puolet viljaville metsämaille (Niemistö 2008). Arvion mukaan noin neljännes näistä istutuskoivikoista tuhoutui mm. sopimattoman kasvupaikan ja rakentamisen vuoksi tai epäonnistui myyrien (*Cricetidae*), jänisten (*Leporidae*), hirven (*Alces alces* Linnaeus) ja ruohokaskaan (*Cicadella viridis* Linnaeus) aiheuttamien vaurioiden vuoksi (Raulo 1979b; Niemistö 1997). 1970-luvun lopulla koivunviljely hiipui epäonnistumisten ja laatuongelmien, kuten lenkouden ja mutkaisuuden vuoksi. Suurempi syy viljelyn vähenemiseen oli ilmeisesti pellonmetsityksen rahoitustuen loppuminen. Ensimmäisen koivunviljelyjakson aikana istutetut puustot ovat nyt (vuonna 2021) 45–50-vuotiaita, joten ne alkavat olla uudistuskypsiä (Oikarinen 1983; Niemistö 2008; Hynynen ym. 2010).

Toinen koivun istutuksen huippujakso ajoittui 20-vuotijaksolle 1985–2004, jolloin rauduskoivua istutettiin 164 000 hehtaarin alalle (Luke Tilastopalvelu). Nämä koivikot ovat mahdollisesti laadultaan aikaisempia parempia, koska virheitä osattiin välttää ja taimet olivat pitemmälle jalostettuja paakkutaimia aikaisempien paljasjuuristen sijaan (Viherä-Aarnio ja Velling 2008). Suurin syy istutuksen vähenemiseen noin 3000 hehtaarin vuositasolle 2000-luvulle tultaessa on ollut hirviturhoriski, mutta nytkin osasy syy oli pellonmetsityksen loppuminen. Vuoden 2004 jälkeen viljeltyjen koivutaimikoiden pinta-ala on noin 45 000 ha (Luke Tilastopalvelu). Valtakunnan metsien inventoinnin (2014–2018) mukaan istutuskoivikoita on em. tilastoa enemmän, yhteensä 347 000 ha, joista onnistuneita on 306 000 ha (Räty 2021).

Istutuskoivun kasvua on tutkittu nuoren kasvatusmetsän vaiheessa (Niemistö 1995b, 1997). Oikarinen (1983) on tehnyt pienestä aineistosta varttuneeseen kasvatusmetsään ja uudistuskypsyyteen asti yltävän kasvu- ja tuotostutkimuksen. Istutusrauduskoivun kasvu on taimivaiheesta selviytymisen jälkeen nopeaa. Suosituksena on istutustiheys 1600 tainta hehtaarille ja kaksi voimakasta harvennusta sekä 40–50 vuoden kiertoaika (Niemistö 2008; Hynynen ym. 2010). Istutuskoivun laatua on tutkittu nuorissa tai keski-ikäisissä metsiköissä (Raulo 1979a, Niemistö 1995a; Mäkinen ym. 2003). Näissä tutkimuksissa tarkasteltiin runkomuotoa ja oksikkuutta keskimäärin, ei vakavia runkovikoja. Hytösen ym. (2014) mukaan samalle kasvupaikalle istutettujen raudus- ja hieskoivujen (*Betula pubescens* Ehrh.) välillä ei ollut laatueroja kangasmaalla, mutta orgaanisella maapohjalla hieskoivut olivat mutkaisempia ja rauduskoivut puolestaan oksikkaampia. Sen sijaan peltomaalle useilla pluspuualkuperillä istutetut rauduskoivut olivat laadultaan vastaavia hieskoivuja parempia (Viherä-Aarnio ja Velling 1999): hyvin hoidetuilla koaloilla 32-vuotiaista rauduskoivusta 94 % ja hieskoivuista 77 % kelpasi laadultaan vaneritukkipuiksi, joilla keskimääräinen tukki-kelpoisen rungonosan pituus oli rauduskoivuilla 6,6 m ja hieskoivuilla 6,2 m.

Koivun istuttaminen Suomessa alkoi puuntuotannon mittakaavassa vuonna 1964 (Raulo 1979b). Näistä paljasjuuritamilla istutetuista rauduskoivuista tutkittiin 30 vuoden iässä sekä ulkoista vikaisuutta (Niemistö ym. 1997) että rungon sisäisiä laho- ja värvikoja (Hallaksela ja Niemistö 1998). Lähes kaikilla laatutunnuksilla mitattuna koivut olivat 15–20 % huonompia peltomailla kuin metsämailla. Metsämaiden istutuskoivuissa oli hieman vähemmän vikaisuutta kuin saman ikäluokan 21–40-vuotiaissa luontaisesti syntyneissä rauduskoivuissa (Heiskanen 1957, 1966), mutta peltomailla puolestaan enemmän. Verkasalon (1990) länsisuomalaisen aineiston luontaisten rauduskoivujen laatu kivennäismailla oli huonompi kuin em. 30-vuotiaiden istutuskoivujen laatu peltomailla.

Jalkasen (2001) mukaan taimikoita vanhemmissa rauduskoivuvaltaisissa metsiköissä 11 prosentissa esiintyi lahoisuutta Etelä- ja Keski-Suomessa (VMI8, 1986–1992). Lahoisuus lisääntyi noin kaksinkertaiseksi, kun puuston keskiläpimitta kohosi 20 cm:stä 30 cm:iin. Monissa muissakin

tutkimuksissa on tarkasteltu luontaisesti syntyneiden rauduskoivujen laatua (esim. Cameron ym. 1995; Heräjärvi 2001, 2002), mutta kasvupaikat, kasvatushistoria ja vaurioriskit ovat niin erilaiset, että tuloksia voi käyttää istutuskoivulle hyvin rajoitetusti, jos ollenkaan. Sama koskee edustavaan aineistoon perustuvaa tukkivähennysmallia (Mehtätalo 2002).

Niemistön ym. (1997) tutkimuksessa istutuskoivuista mutkaisiksi luokiteltiin peltomailla 61 % ja metsämailla 45 %, mutta haarojen ja pystyoksien esiintymisessä (12 %) ei ollut eroa. Rungoltaan pintavikaisia oli peltomailla 14 % ja metsämailla 9 %. Runkomuodoltaan virheettömiä koivuja oli peltomailla 28 % ja metsämailla 42 %. Tutkittuja puita oli keskimäärin 800 ha⁻¹, joista todennäköisesti noin puolet kasvatetaan päätehakkuuseen saakka. Harvennuksen laatuvalinnasta huolimatta merkittävä osa päätehakkuun koivuista tulee sisältämään runkovikoja, jotka rajoittavat puutavaran katkontaa ja vähentävät tukkipuun kertymää hakkuissa etenkin peltomailla.

Puun ytimessä todettiin lähes kaikilla istutuskoivuilla kovaa värivikaa (metsämaat 90 %, peltomaat 93 %), mutta vian läpimitta oli 30 vuoden iässä pieni (peltomailla keskimäärin 3 cm ytimestä, metsämailla 2 cm) ja niiden ulottuvuus pystysuunnassa oli peltomailla keskimäärin 4,1 m ja metsämailla 3,4 m (Hallaksela ja Niemistö 1998). Pehmeää lahoa esiintyi tässä vaiheessa hyvin niukasti. Rungon sisäisten laatuviikojen kehitystä varttuneissa yli 30-vuotiaissa istutuskoivikoissa ei ole tutkittu, eikä myöskään sisäisten ja ulkoisten viikojen vaikutusta tukin ja ainespuun kertymiin. Piilossa olevaa värivikaisuutta tai lahoa ei pystytä ottamaan huomioon harvennusvalinnassa.

Merkittävä määrä istutuskoivikoita on tulossa päätehakkuuseen. VMI12:n mukaan istutuskoivikoista uudistuskypsiä on 4000 ha ja varttuneita kasvatusmetsiä 73 000 ha (Räty 2021). Tässä tutkimuksessa selvitetään, miten istutuskoivun järeys ja laatu vaikuttavat toteutuneisiin vaneritukkien ja kaiken ainespuun kertymiin päätehakkuussa. Laatuerot pelto- ja metsämailla on aikaisemmissa tutkimuksissa todettu suuriksi, joten tuloksia tarkastellaan erikseen näissä kahdessa maaluokassa. Rungon dimensiot vaikuttavat oleellisesti ainespuu- ja tukkikertymään. Samalla vikaisuus suurentaa tukkivähennystä sitä enemmän, mitä pienempi tukkipuukokoinen runko on kyseessä, joko pienentäen tukkiosan tilavuutta tai pudottamalla rungon kokonaan kuitupuuluokkaan. Tästä syystä päätehakkuissa toteutuneita puukohtaisia kertymiä tarkastellaan puun rinnankorkeusläpimitan funktiona ja verrataan runkojen dimensioiden mukaisiin potentiaalisiin kertymiin.

Tukkivähennysprosentilla tarkoitetaan sitä prosenttiosuutta mitat täyttävästä teoreettisesta tukkitilavuudesta, jota ei puun laadun vuoksi tehdä tukiksi. Olemassa olevat tukkivähennysmallit (Mehtätalo 2002) perustuvat edustavaan VMI-aineistoon, jonka koepuiden dimensiot ja katkontaan vaikuttavat laatutekijät on mitattu tarkasti. Uudistuskypsistä istutuskoivikoista ei riittävää aineistoa ole tällä tavoin saatavissa. Toisaalta runkojen sisäisten viikojen runsauden vuoksi (Hallaksela ja Niemistö 1998) todellinen tukkivähennys havaitaan vain kaatamalla ja katkomalla puut. Laatumittausten sijasta tutkimuksessa hyödynnetään hakkuukonedataa, josta saadaan runsaasti havaintoja runkojen dimensioista ja katkonnasta, ja siten käytännöllistä runkokohtaista tietoa tukin ja kuitupuun toteutuneista kertymistä.

Pelkän hakkuukonemittauksen menetelmät ja luotettavuus eivät kuitenkaan riitä, kun tarvitaan tarkat tiedot runkojen mitoista ja teoreettisista tukki- ja kuitupuutilavuuksista ilman katkontaa rajoittavia vikoja. Hakkuuaineisto hankittiin lopetettavista harvennuskokeista, joissa pystyput mitattiin juuri ennen hakkuuta. Tutkimushakkuut olivat mahdollisimman tavanomaisia kartalle ja maastoon rajattuja avohakkuuleimikoita, jotka koneenkuljettajat toteuttivat ilman tutkimuksen aiheuttamia lisätoimia ja keskeytyksiä. Tästä syystä vertailu ennakkoon mitattujen koealapidien ja hakkuukonedatan välillä tehtiin rinnankorkeusläpimitaan perustuvien mallien avulla, ei suorana kytkentänä koeala- tai puuyksilötasolla.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Hakkuuaineisto

Tutkimus toteutettiin Luonnonvarakeskuksen harvennuskoekehteilla, joiden puustot olivat saavuttaneet päätehakkuiän ja jotka avohakattiin kokeita lopetettaessa. Tutkimus tehtiin talvella 2020 seitsemällä keskisuomalaisella viljelykoivualalla, jotka oli istutettu vuosina 1969–1976 (Taulukko 1). Tutkimusalueet ovat osa Metsäntutkimuslaitoksen vuosina 1984–1991 perustamia rauduskoivun harvennuskokeita (Niemistö 1997). Tutkimusta varten koealueille muodostettiin yhtenäisiä tutkimuslohkoja, jotka sisälsivät vaihtelevan määrän koealoja harvennuskäsittelyineen (Taulukko 2) ja vaippavyöhykkeitä, joiden puustoa oli harvennettu samalla tavoin kuin lähimmällä koealalla (Kuva 1). Metsikkökuvion reunametsä rajattiin tutkimusalueen ulkopuolelle. Suurella puumäärällä työläs hakattujen ja ennakkomitattujen puuyksilöiden identifiointi jätettiin tekemättä, josta syystä vertailu toteutuneen ja teoreettisen puutavaralajikertymän välillä toteutettiin puutason malleilla. Myös koealoittain eriytetystä hakkuusta luovuttiin, mikä mahdollisti tavanomaisen hakkuutyöskentelyn tutkimuslohkolla, jolloin tieto harvennuskäsittelystä ja työn jatkuva keskeytyminen eivät vaikuttaneet kuljettajan päätöksiin runkojen katkonnassa.

Puukauppojen osapuolten kanssa sovittiin, että koivun katkonnassa noudatetaan seuraavia nykykäytännön mukaisia sääntöjä:

Vaneritukin dimensiot: Latvaläpimitan minimi 18 cm kuoren päältä, pituudet (cm): 330, 405, 435, 495, 540, 570, 600 ja 670.

Vaneritukin laatu: Tukin tyvessä ja latvassa on oltava vähintään 150 cm:n pituudella seuraavat laatuvaatimukset täyttävää puuta: Enintään viisi yli 10 mm:n paksuista lahoa tai kuivaa oksaa, suurta oksakyhmyä ja poikaoksa. Terveen oksan maksimiläpimitta on 70 mm. Kuivan, lahon tai poikaoksan maksimiläpimitta on 30 mm. Lenkoutta sallitaan alle 30 cm:n läpimitassa 30 mm/150 cm ja sitä paksummassa pölkyssä 50 mm/150 cm. Kovapohjainen koro, umpihaava tai epämuotoisuus (mm. soikeus, kantikkuus, piparkakku-tyvi) sallitaan vain 150 cm:n moduulin latvalierion ulkopuolella. Kovaa värillistä puuta sydämessä tai sydänhalkeamaa sallitaan korkeintaan kolmannes alle 24 cm:n läpimitasta ja korkeintaan puolet yli 24 cm:n läpimitasta.

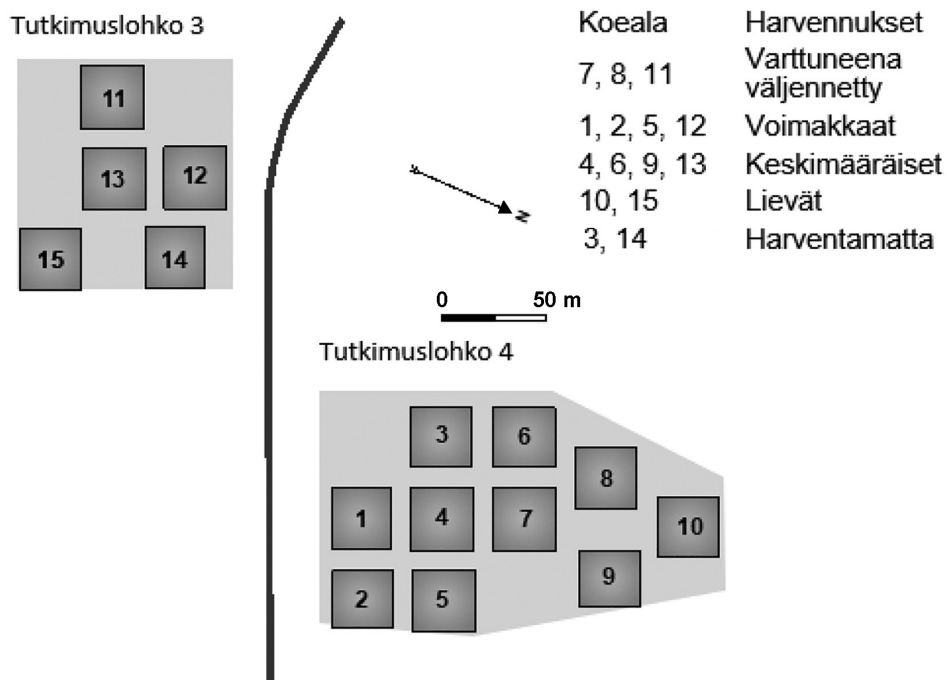
Taulukko 1. Tutkimuslohkojen keskimääräinen puusto syksyn 2019 koelamittauksissa ja talven 2020 tutkimushakkuissa kertyneet koivut hakkuuraporttien mukaan.

Tutkimuslohko	Maaluokka	Vuosia istutuksesta	Valtapiitus m	Koeala-aineisto			Hakkuuaineisto		
				Runkoluku kpl ha ⁻¹	Pohja-pinta-ala m ² ha ⁻¹	Runko-tilavuus m ³ ha ⁻¹	Koivuja kpl	Ainespuuta m ³	Runko keskim. dm ³
Pieksämäki 1	Peltomaa	49	29,2	569	23,5	296	1284	522	407
Pieksämäki 2	Peltomaa	49	29,5	381	18,3	243	809	385	476
Pieksämäki 3	Metsä (MT)	49	28,8	491	21,8	261	628	273	435
Pieksämäki 4	Metsä (MT)	49	28,5	480	20,2	240	1197	435	364
Uurainen 1	Metsä (MT)	51	27,6	463	17,9	233	470	182	388
Uurainen 2	Peltomaa	44	29,6	648	23,6	304	477	186	390
Perho 1	Peltomaa	49	27,0	504	20	234	536	212	396
	Metsämaat	49,7	28,3	478	20,0	245	2295	890	388
	Peltomaat	47,8	28,8	525	21,4	269	3106	1305	420
	Yhteensä	48,6	28,6	505	20,8	259	5401	2195	406

Taulukko 2. Tutkimuslohkojen sisältämät koealapuustot harvennuskäsittelyittäin (N = runkoluku hehtaarilla, D_{1,3} = aritmeettinen keskiläpimitta, cm). Harvennukset tehtiin alaharvennuksina, paitsi puolet Uurainen 1:n viimeisistä käsittelyistä on tehty yläharvennuksena.

Tutkimuslohko	Puusto- tunnus	Harventamatta	Lievät harvennukset	Keskim. harvennukset	Keskim. + voimakas harvennus	Yksi voimakas harvennus	Kaksi voimakasta harvennusta	Varttuneen metsän väljennys
Pieksämäki 1	N ha ⁻¹ D _{1,3} cm	1189 18,0			306 27,4	450 ³⁾ 25,3		
Pieksämäki 2	N ha ⁻¹ D _{1,3} cm		539 21,0		544 24,2	315 27,3	300 26,9	207 25,6
Pieksämäki 3	N ha ⁻¹ D _{1,3} cm	856 19,2	656 23,3		378 27,8		267 27,3	300 25,4
Pieksämäki 4	N ha ⁻¹ D _{1,3} cm	1200 16,4	667 21,8	517 ²⁾ 23,7		373 ²⁾ 26,6	306 ²⁾ 25,9	272 ²⁾ 24,8
Uurainen 1	N ha ⁻¹ D _{1,3} cm		705 ²⁾ 20,4	595 21,2	345 ²⁾ 25,6 ¹⁾	490 ²⁾ 20,5	245 ²⁾ 24,3 ¹⁾	
Uurainen 2	N ha ⁻¹ D _{1,3} cm	827 ³⁾ 20,5		390 20,9	370 27,0			
Perho 1	N ha ⁻¹ D _{1,3} cm		744 ²⁾ 20,5		266 ³⁾ 24,4		430 ²⁾ 24,5	

¹⁾ toinen koeala yläharvennettu, ²⁾ kaksi koealaa, ³⁾ kolme koealaa.



Kuva 1. Kartta tutkimuslohkoista Pieksämäki 3 ja 4 ja vastaavat tutkimuslohkot harmaalla.

Em. 150 cm:n moduulien välissä tukin keskellä sijaitsevassa välivähennyksessä sallitaan koivulle luontaista vikaisuutta 150 cm:n matkalla, mutta vaneritukissa ei sallita pehmeää lahoa, rengashalkeamaa, juurenniskaa, äkkimutkaa, monivääryyttä tai haara-puuta (kaksoissydän) eikä lenkoutta, jossa tukin päiden keskipisteiden välinen jana menee tukin ulkopuolelle. Välivähennyksen ulkopuolella ei sallita oksaryhmää, jos siinä 20 cm:n matkalla on enemmän kuin kaksi oksaa (läpimitaltaan yli 30 mm:n tuoreoksa, ja yli 10 mm:n kuivaa tai lahoa oksaa) tai oksakyhmyä.

Kuitupuun dimensiot: Latvaläpimitan minimi 6 cm, pituus 3 m (sallitaan 2,6–3,2 m).

Kuitupuun laatu: Pehmeää sydänlahoa sallitaan enintään puolet pölkyn läpimitasta, kun tervettä puuta on vähintään 6 cm. Pintalahoja ja pystykuivia pölkkyjä ei sallita, eikä kuoriutumista haittaavia mutkia, haaroja, oksaryhmiä, isoja oksia (yli 10 cm:n pituiset, kun läpimitta on yli 4 cm) tai huomattavia tyvilaajentumia.

Hakkuut toteutettiin normaalisti puun ostajien ja koneurakoitsijoiden käytänteiden mukaisesti. Kuljettajat olivat kokeneita ja hakkuukoneet moderneja (Ponsse Scorpion/H6 ja John Deere 1170 G/212). Hakkuu tapahtui talvella valoisaan aikaan. Hakkuukoneelta otettiin tutkimuslohkon raportti puu- ja puutavaralajeittain sekä STM-tiedosto, josta saatiin hakkuujärjestyksessä runkotiedot (puulaji ja läpimitta) sekä pölkkytiedot (latvaläpimitat, pituudet ja tilavuudet). Rinnan-korkeusläpimittana käytettiin runkoprofiilista 1,2 m:n etäisyydeltä kaatoleikkauksesta saatua läpimittaa, joten kannonkorkeudeksi oletettiin 10 cm. Kaikkiaan tutkimuksessa hakattiin vaneritukkia 806 m³ ja koivukuitupuuta 1390 m³ (Taulukko 3). Hakatusta puutavarasta 40 % kertyi metsämailta ja 60 % peltomailta.

STM-dataa korjattiin puiden prosessoinnissa irronneiden tai katkenneiden ja haaraisten runkojen osalta, koska päärunгон prosessoinnin keskeydyttyä STM-tiedostoon muodostui puun latvaosasta yksi tai useampi ”uusi puu”. STM-tiedostot purettiin puittain hakkuujärjestyksen mukaisiksi taulukoiksi (rivi = puu) ja haettiin niistä selvästi kesken jääneet päärungot, joihin liitettiin yksi tai useampi latvaosa päärunkoa seuraavilta riveiltä. Huomioitiin myös mahdollisuus, että latvaosa jäi prosessoimatta tai ennen sitä voitiin hakata yksi tai useampi kokonainen puu. Tunnistamista varten ko. päärungot merkittiin katkenneiksi tai haaroittuneiksi riippuen latvaosien lukumäärästä. Menettely sujui luotettavasti ja korjausten jälkeen tukkirunkojen lukumäärä pysyi ennallaan, mutta kuitupuurunkojen lukumäärä väheni hakkuuraportteihin verrattuna metsämailla 251:llä (11 %) ja peltomailla 466:lla (15 %) (vrt. Taulukot 1 ja 3).

Taulukko 3. Hakkuuaineisto STM-tiedostojen korjauksen jälkeen.

Tutkimuslohko	Tukkirungot		Kuitupuurungot		Tukkeja		Kuitupuupölkkyjä	
	kpl	*m ³	kpl	*m ³	kpl	m ³	kpl	m ³
Pieksämäki 1	565	376	467	148	893	209	5510	313
Pieksämäki 2	365	257	305	129	627	144	3732	241
Pieksämäki 3	347	211	212	62	585	128	2781	145
Pieksämäki 4	506	301	525	133	788	171	5114	264
Uurainen 1	205	104	249	78	257	52	2949	129
Uurainen 2	124	78	332	109	162	38	2781	148
Perho 1	214	134	268	78	323	63	2427	150
Metsämaa	1058	616	986	273	1630	351	10844	539
Peltomaa	1268	844	1372	464	2005	455	14450	851
Yhteensä	2326	1460	2358	737	3635	806	25294	1390

*ainespuuta

2.2 Koeala-aineisto

Hakatut rauduskoivun harvennusalat sisälsivät ensiharvennukselta lähtien eri voimakkuuksilla harvennettuja ja harventamattomia koealoja (Niemistö 1997, Taulukko 2). Karkeasti luokitellen voimakkaasti, keskimääräisesti ja lievästi tai ei lainkaan harvennetut puustot olivat tasapainoisesti edustettuina muilla tutkimuslohkoilla paitsi Uurainen 2, jolla hakkuu omistajan rajaamana kohdistui kolmelle harventamattomalle ja vain kahdelle harvennetulle koealalle. Maalajiltaan tutkimuslohkot olivat kohtuullisen hyvin vettä läpäisevää hietamoreenia, mutta em. Uurainen 2 sijaitsi osittain muita hienojakoisemmalla ja kosteammalla maalla.

Koealojen viimeisestä harvennukselta oli aikaa 10–20 vuotta. Harvennukset ovat olleet tavanomaisia alaharvennuksia, joissa kasvamaan jätettiin suurimmat ja elinvoimaisimmat, laadultaan hyvät tai normaalit puut. Poikkeuksena on tutkimuslohko Uurainen 1, jolla puolet puuston viimeisistä käsittelyistä on tehty yläharvennuksina siten, että osa tukkipuukokoisista päävaltapuista poistettiin ja tehtiin tilaa elinvoimaisille ja hyvälaatuisille lisävaltapuille.

Koealojen kaikista puista mitattiin syksyllä 2019 rinnankorkeusläpimitta kahdesta kohtisuorasta suunnasta millimetrin tarkkuudella. Keskimäärin 18 koepuusta per koeala (8–31 kpl) mitattiin pituus desimetrin tarkkuudella, ja koepuiden kapenemisen ($d_{1,3}-d_{6,0}$) oletettiin pysyneen yhtä suurena kuin viisi vuotta aikaisemmin, jolloin niistä oli mitattu myös yläläpimitat 6 metrin korkeudesta. Puu- ja koealataso tunnuksia laskettiin KPL-ohjelmalla (Heinonen 1994). Lukupuiden pituudet estimoitiin sovittamalla Näslundin (1936) pituuskäyrä erikseen jokaisen koealan koepuumittauksiin. Koepuiden runkotilavuus (v) laskettiin Laasasenahon (1982) koivun tilavuusfunktioilla $v=F(d_{1,3}, h, d_{6,0})$. Lukupuiden runkotilavuus laskettiin rinnankorkeusläpimitan ja tilavuuden tasoituskäyrästä, joka sovitettiin erikseen jokaisen koealan koepuumittauksiin (Heinonen 1994).

Runkojen laatua ei KPL-laskennassa huomioitu, joten apteraus puutavaralajeihin optimoitiin vain dimensioiden perusteella Laasasenahon (1982) runkokäyriin perustuen. Apteerauksessa tukkien latvaläpimitan minimi kuoren päältä oli 18,0 cm ja minimipituus oli 3,3 m. Kuitupuun latvaläpimitan minimi oli 6 cm ja pituus sai vaihdella vapaasti välillä 3–6 m. Näin ollen yli 6 cm:n läpimittainen runkopuu laskettiin ainespuuksi lukuun ottamatta aivan pieniä puita, joiden tyvestä ei saatu ensimmäistäkään vähintään 3 m:n pituista kuitupuupölkkyä.

Koeala-aineiston kaikki puut (Taulukko 4) sisältyivät Hakkuuaineistoon (Taulukko 3), joka sisälsi lisäksi koealojen välissä ja ympärillä olevaa vaippavyöhykkeen puustoa, jota oli harvennettu samalla tavalla kuin lähimpänä sijaitsevan koealan puusto (Kuva 1). Koeala-aineiston tarkasti ja

Taulukko 4. Koeala-aineiston puiden lukumäärä ja keskiläpimitta tutkimuslohkoittain ($D_{1,3}$ = aritmeettinen keskiläpimitta, cm).

Tutkimuslohko	Koealoja	Puita	$D_{1,3}$	Tukkipuu- kokoisia	$D_{1,3}$	Kuitupu- kokoisia	$D_{1,3}$
Pieksämäki 1	5	256	22,4	171	25,3	85	16,6
Pieksämäki 2	5	173	24,4	147	25,6	26	17,6
Pieksämäki 3	5	221	23,2	171	25,3	50	16,1
Pieksämäki 4	10	431	22,5	312	25,2	119	15,4
Uurainen 1	9	360	21,8	272	23,2	88	17,7
Uurainen 2	5	324	21,1	198	23,7	126	17,2
Perho 1	7	276	22,5	204	24,3	72	17,4
Metsämaat	24	1012	22,4	755	24,5	257	16,3
Peltomaat	22	1029	22,4	720	24,6	309	17,1
Yhteensä	46	2041	22,4	1475	24,5	566	16,7

luotettavasti mitattujen puiden (43,6 % hakatuista) avulla hakkuuseen perustuvia tukki- ja ainespuusaantoja verrattiin teoreettisiin kertymiin, jotka perustuivat pelkästään rungon dimensioiden mukaiseen optimaalisen katkontaan. Tämän vertailun avulla laskettiin läpimittaluokittain vikaisuuden ja rajoitetun katkontan aiheuttamat tukkitilavuuden ja ainespuutilavuuden vähennykset teoreettisesta maksimista.

Teoreettiset rungonosat ja runkolajit määritettiin Koeala-aineiston puiden runkokäyryltä (Laasasenaho 1982) seuraavasti:

Teoreettinen ainespuosa: Rungon osa, joka on pituudeltaan vähintään 3 m ja täyttää läpimitaltaan koivukuitupuun minimilatvaläpimitan 6 cm kuoren päältä.

Teoreettinen tukkiosa: Rungon osa, joka on pituudeltaan vähintään 3,3 m ja täyttää läpimitaltaan vaneritukin minimilatvaläpimitan 18 cm kuoren päältä. Minimipituudesta ylöspäin tukin apteerauksessa sovelletaan vapaasti 0,3 metrin katkontaväliä, koska maksimipituutta 6,3 m pitemmät tukkiosat voidaan jakaa useammaksi tukiksi.

Teoreettinen ainespuurunko: Runko, josta dimensioiden puolesta saadaan ainakin yksi 3 m:n pituinen kuitupuupölkky.

Teoreettinen tukkirunko: Runko, josta dimensioiden puolesta saadaan ainakin yksi em. tukki. Koivurunkojen kapenemiseen perustuvan rajauksen mukaan 1,3 metrin korkeudelta alle 19,5 cm:n läpimittainen puu ei voi olla tukkirunko.

Hakkuussa toteutuneet rungonosat ja runkolajit määritettiin puu- ja pölkkytasolla mitatusta Hakkuuaineistosta (4684 puuta) seuraavasti:

Toteutunut ainespuosa: Hakkuukoneen yhdestä puusta tekemien tukkien ja kuitupuupölkkyjen tilavuuksien summa (ks. mitta- ja laatuvaatimukset edellä). Kuitupuun katkottiin 3 metrin ohjepituuteen ja alle 2,6 m:n pituiset pölkkyt hylättiin.

Toteutunut tukkiosa: Hakkuukoneen yhdestä puusta tekemien tukkien tilavuuksien summa (ks. mitta- ja laatuvaatimukset edellä). Tukin minimipituus oli 3,3 m ja minimiläpimitta 18 cm kuoren päältä.

Toteutunut tukkirunko: Runko, josta hakkuussa tehtiin vähintään yksi tukki.

Toteutunut ainespuurunko: Runko, josta hakkuussa tehtiin vähintään yksi tukki tai ainespuupölkky.

Rungonosien tilavuuksien toteutuneet tai ennustetut vähennykset määriteltiin seuraavasti:

Raakki: Teoreettisen tukkiosan ja toteutuneen tukkiosan erotus.

Hylky: Teoreettisen ainespuuosan ja toteutuneen ainespuuosan erotus.

Tukkivähennys: Raakin suhteellinen osuus puun teoreettisen tukkiosan tilavuudesta.

Ainespuuvähennys: Hylyn suhteellinen osuus puun teoreettisesta ainespuutilavuudesta.

2.3 Mallinnus

Rungoista kertyneen tukin ja ainespuun määrä mallinnettiin hakkuuaineistosta laadituilla malleilla 1–4. Tarkasti mitatusta koeala-aineistosta tehtiin mallit 5–7 kuvaamaan rungon kokonaistilavuutta ja teoreettista ainespuu- ja tukkitilavuutta ilman vikojen aiheuttamia vähennyksiä. Tukki- ja ainespuuvähennys erikokoisille puille lasketaan näillä malleilla saatujen tilavuuksien erotuksina.

Osa tukkipuukokoisista rungoista hakattiin viallisen laadun vuoksi kokonaan kuitupuuksi. Todennäköisyys, että rungosta tehdään vähintään yksi vaneritukki, mallinnettiin Hakkuuaineistossa (Taulukko 3) yleistetyllä logistisella sekamallilla, jossa puun rinnankorkeusläpimitta ja maaluokka (Metsämaa tai Peltomaa) tulkittiin kiinteiksi muuttujiksi ja Tutkimuslohko tulkittiin satunnaiseksi lohkokotijäksi (logistinen malli 1). Lisäksi haluttiin erikseen tarkastella tukkipuusaannon vaihtelua

tutkimuslohkoittain. Tarkastelua varten laadittiin logistinen yleistetty lineaarinen malli, jossa Tutkimuslohko tulkittiin kiinteäksi muuttujaksi, jolle estimoitii kertoimet (logistinen malli 2).

Yleistetty lineaarinen sekamalli (Bernoulli-jakauma) 1 voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$y_{ij} \sim \text{Bernoulli}(n_{ij}, \pi_{ij})$$

$$\text{logit}(\pi_{ij}) = \ln\left(\frac{\pi_{ij}}{1 - \pi_{ij}}\right) = \beta_1 \text{Maaluokka} + \beta_2 d_{1,3ij} + \beta_3 \text{Maaluokka}_i \times d_{1,3ij} + \mu_i, \quad (1)$$

missä y_{ij} on Bernoulli-jakautunut muuttuja: puusta tulee tukki (1) tai puusta ei tule tukkia (0). Symboli n_{ij} tarkoittaa havaintojen määrää ja π_{ij} tarkoittaa mallin odotusarvoa. Tasot i ja j tarkoittavat

Tutkimuslohkoa (i) ja puuta (j). $\ln\left(\frac{\pi_{ij}}{1 - \pi_{ij}}\right)$ tarkoittaa logit-linkkifunktiota, β_1 tarkoittaa Maaluok-

kan kerrointa (määritetty tutkimuslohkon tasolta) ja β_2 tarkoittaa rinnankorkeusläpimitan $d_{1,3ij}$ kerrointa (mitattu puutasolta). $\text{Maaluokka}_i \times d_{1,3ij}$ tarkoittaa näiden muuttujien yhdysvaikutusta, jonka kerroin on β_3 . Tekijä μ_i tarkoittaa Tutkimuslohkon varianssia.

Yleistetty lineaarinen malli (Bernoulli-jakauma) 2, jossa Tutkimuslohko ja $d_{1,3}$ sekä niiden yhdysvaikutus ovat kiinteinä muuttujina, voidaan kirjoittaa muotoon:

$$\text{logit}(\pi_{ij}) = \ln\left(\frac{\pi_{ij}}{1 - \pi_{ij}}\right) = \beta_1 \text{Tutkimuslohko}_i + \beta_2 d_{1,3ij} + \beta_3 \text{Tutkimuslohko}_i \times d_{1,3ij}, \quad (2)$$

jossa β_3 kuvaa Tutkimuslohkon ja $d_{1,3}$:n yhdysvaikutuksen kertoimia. Malissa ei ole satunnaistekijää, vaan Tutkimuslohkolle on kiinteät estimaatit ja mallin hajontaparametri (dispersion parameter) on estimoitu.

ROC-käyrä (Received Operating Characteristics) laskettiin logistisen mallin luokitustehon määrittämiseksi. Mitä lähempänä ROC-arvo on 1:stä, sitä paremmin logistinen malli ennustaa oikein sen, että puusta tulee tukki (Fawcett 2006). ROC-käyrä laskettiin R-ohjelmointiympäristössä R:n paketilla pROC (Robin ym. 2011). Logistinen yleistetty sekamalli (Malli 1) laadittiin R:n paketilla MASS (Venables ja Ripley 2002), funktiolla glmmPQL. Yleistetty lineaarinen malli (Malli 2) estimoitii R:n funktiolla glm (R Core Team 2018). Logististen mallin ennustekuvat piirrettiin R:n paketilla ggplot2 (Wickham 2016).

Hakuussa toteutuneiden ja toisaalta koealoilta mitattujen teoreettisten puukohtaisten ainespuu- ja tukkitilavuuksien perusteella tehtiin yleiset lineaariset sekamallit 3–7 (Mixed Linear in IBM SPSS Statistics Version 25, IBM Corp 2018), joiden muoto oli:

$$\ln(Y_{ij}) = \beta_0 + \beta_{1\text{Peltomaai}} + \beta_2 d_{1,3ij} + \beta_{3\text{Peltomaai}} \times d_{1,3ij} + \beta_4 \ln(d_{1,3ij}) + \beta_{5\text{Peltomaai}} \times \ln(d_{1,3ij}) + \mu_i + \varepsilon_{ij}, \quad (3-7)$$

jossa:

- Y_{ij} = Selitettävä muuttuja Tutkimuslohkolla i ja puulla j
- β_0 = Vakiotermi
- $\beta_1, \beta_3, \beta_5$ = Peltomaan kiinteät vaikutukset tasolla i (referenssinä Metsämaa)
- β_2, β_4 = Puun läpimitan kertoimet tasolla ij
- $d_{1,3ij}$ = Puun läpimita, mitattu puusta Tutkimuslohkolla
- μ_i = Tutkimuslohkon satunnaisvaikutus
- ε_{ij} = Satunnaisvirhe

Malli 3: Toteutunut ainespuuosan tilavuus mallitettiin Hakkuuaineistossa (Taulukko 3, 4684 puuta).

Malli 4: Toteutunut tukkiosan tilavuus mallitettiin Hakkuuaineiston tukkia sisältäneiden koivujen aineistossa (2326 puuta).

Mallit 5 ja 6: Rungon kokonaistilavuus ja teoreettinen ainespuutilavuus mallitettiin Koeala-aineistossa (Taulukko 4, 2041 puuta).

Malli 7: Rungon teoreettisen tukkiosan tilavuus mallitettiin Koeala-aineiston tukkipuukokoisista rungoista ($d_{1,3} > 19,4$ cm, 1475 puuta), ja se riippui edellisistä poiketen suoraviihaisesti puun rinnankorkeusläpimitasta, joten vastemuuttuja oli Y_{ij} ja selittävä muuttuja $\ln(d_{1,3})_{ij}$ jäi mallista pois.

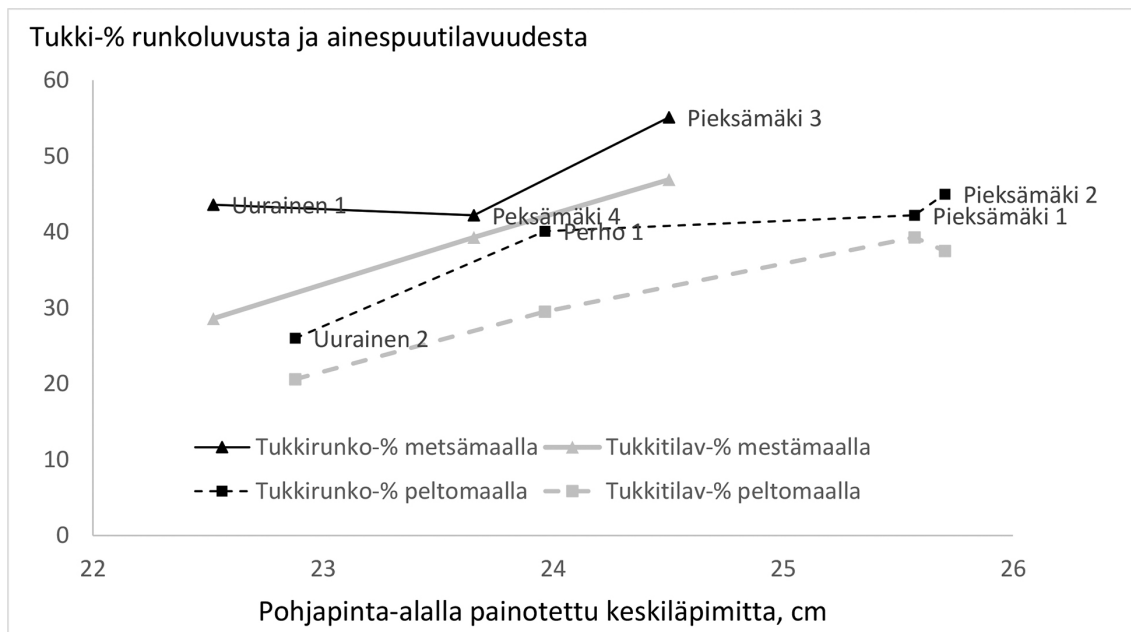
Tukki- ja ainespuuvähennykset laskettiin puittain Koeala-aineistossa, jossa rungonosien teoreettiset tilavuudet tunnettiin. Ainespuun saanto hakkuussa laskettiin mallilla 3 ja ainespuuvähennys saatiin erotuksena teoreettisesta ainespuutilavuudesta. Kaikista teoreettisista tukkipuista ($d_{1,3} > 19,4$ cm) ei tehdä tukkia, joten osa niistä piti raakata kuitupuiksi. Valinta tehtiin satunnaislukugeneraattorilla Bernoulli(x) (IBM SPSS Statistics Version 25, IBM Corp 2018), jossa x on mallilla 1 puulle saatu tukkipuutodennäköisyys, kun 0 = ei tukkirunko ja 1 = tukkirunko. Näin satunnaistetuille tukkirungoille laskettiin tukkiosan tilavuus mallilla 4. Bernoulli-jakauman mukainen satunnaistus toistettiin sata kertaa ja läpimitan vaikutus toteutuneeseen tukkisaantoon laskettiin mallien 1 ja 4 yhteisvaikutuksen keskiarvona 2 cm:n läpimittaluokissa. Satunnaistamisen vuoksi myös tukkivähennys saatiin läpimittaluokittain, ei yksittäisille puille.

Eri tavoin harvennettuja koealoja ei hakkuun yhteydessä eriytetty, mutta harvennuksen vaikutusta tukkivähennyksen ennusteen luotettavuuteen tarkasteltiin kolmessa ositteessa, jotka saatiin jakamalla hakkuuaineisto läpimittasekvenssien perusteella seuraavasti: 1) hakattiin voimakkaasti harvennettua puustoa, 2) hakattiin tiheää tai kokonaan harventamatonta puustoa tai 3) hakattiin sekalaisesti tai keskimääräisesti harvennettua puustoa. Lisäksi harvennuksen ja puuston keskiläpimitan vaikutusta tukkivähennykseen tutkittiin soveltamalla malleja tutkimusaineistoon kuulumattomilla metsä- ja peltomaan harvennuskokeilla. Laasasenahon (1982) runkokäyrien avulla verrattiin teoreettisia kertymia, kun vaneritukin läpimittavaatimus nostettiin 18 cm:stä 20 cm:iin, tai kuitupuu katkottiin vapaan pituuden sijasta 3 m:n tasapituuteen.

3 Tulokset

3.1 Tukkiosuus tutkimuslohkoittain

Tukkiosuudet istutuskoivikoiden päätehakuissa lisääntyivät selvästi hakatun puuston keskiläpimitan kasvaessa. Metsämaalla toteutunut vaneritukin osuus toteutuneesta ainespuutilavuudesta oli 29–47 % ja peltomaalla 21–39 % (Kuva 2). Toteutunut tukkirunkojen osuus ainespuurunkojen lukumäärästä oli tilavuusosuutta suurempi: metsämailla 42–55 % ja peltomailla 26–45 %. Pienhkö tukkiprosentti selittyy puustojen nuoruudella ja sillä, että tutkimuslohkot sisälsivät myös harventamatonta tai hyvin lievästi harvennettuja koealoja. Metsämailla tukin osuus ainespuusta oli keskimäärin 6 %-yksikköä korkeampi kuin peltomailla. Toteutuneessa tukkirunkojen osuudessa ero kahden maaluokan välillä oli suurempi (9 %-yksikköä), joten koivun huonompi laatu peltomailla pienensi suhteellisesti enemmän tukkirunkojen lukumäärää kuin tukkirungoista saatavan vaneritukin määrää.



Kuva 2. Istutuskoivikoiden päätehakuissa toteutuneen tukkirunkoprosentin (osuus runkoluvusta) ja tukkiprosentin (tilavuusosuus ainespuusta) riippuvuus puuston keskiläpimitasta metsämailla ja peltomailla.

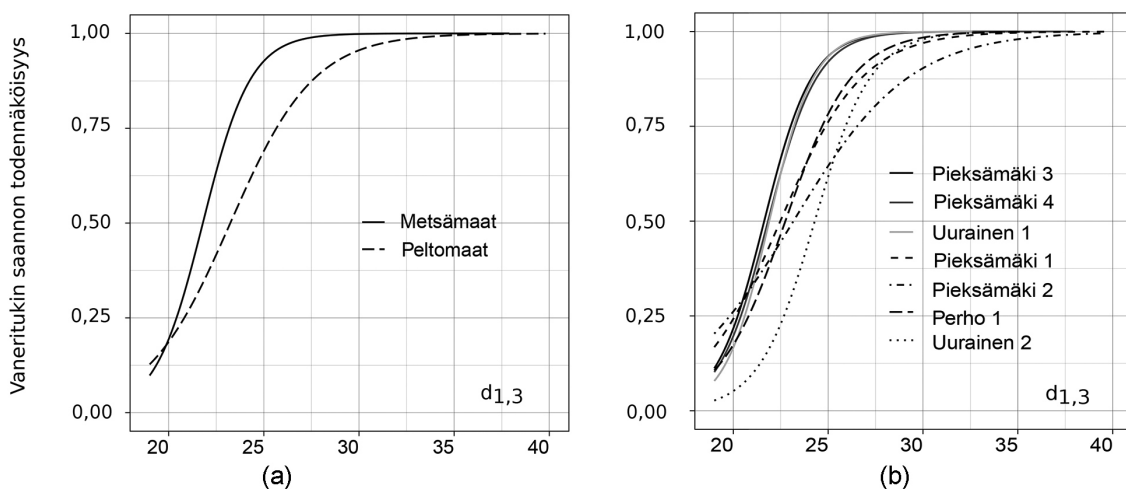
3.2 Mallit

Mallilla 1 ennustettiin läpimitan perusteella todennäköisyys sille, että rungosta saatiin vähintään yksi vaneritukki (Taulukko 5). Käytetyllä linkkifunktiolla tukkirungon todennäköisyys välillä $0-1 = 1/(1 + \exp(-X))$, kun X lasketaan mallilla (Kuva 3a). Peltomailla tukkipuukokoisia runkoja raakattiin enemmän kuitupuiksi kuin metsämailla. Pienimmistä tukkipuukokoisista rungoista vain 20 % oli laadultaan sellaisia, että niistä saatiin tukkia niin metsämailla kuin peltomailla. Rinnan- korkeudelta 25 cm:n paksuisista rungoista toteutuneita tukkirunkoja oli metsämailla 90 %, mutta peltomailla vähemmän, 70 %. Järeästä, 30 cm:n läpimittaisesta metsämaan rauduskoivusta saatiin tukkia 99,6 %:n todennäköisyydellä, kun luku peltomailla oli 93 %. Malli kykeni luokittamaan havainnot hyvin (0/1), koska luokitusheoa kuvaava ROC-arvo oli 0,91. Lohkotasolle mallitettuna (Malli 2, Kuva 3b) metsämaan tutkimuslohkojen tulokset olivat lähes identtiset, mutta peltomaiden välillä oli suuret erot. Pieksämäki 2:n koivuissa havaittiin silmämääräisestikin poikkeavan paljon väri- ja lahovikaisuutta siten, että järeätkään rungot eivät aina kelvanneet tukkipuiksi. Uurainen 2 puolestaan oli poikkeavan tiheä metsikkö ja maaperä osittain hienojakoista ja kosteaa rauduskoivulle. Näistä syistä päätehakuissa oli runsaasti huonolaatuisia alle 25 cm:n paksuisia runkoja.

Linearisella sekamallilla 3 ennustettiin toteutunutta ainespuutilavuutta (dm^3 per runko) kaikista hakatuista koivuista ja mallilla 4 toteutunutta tukkiosan tilavuutta niissä puissa, joista tukkia tehtiin (Taulukko 6). Selitettävän muuttujan logaritimuunnoksen vuoksi malleja sovellettaessa niiden antamia tilavuuksia korjattiin suhdeluvulla ”vastemuuttujan keskiarvo aineistossa /mallilla laskettujen ennusteiden keskiarvo” (Snowdon 1991). Mallissa 3 ko. kerroin oli 1,010 ja mallissa 4 vastaavasti 1,058.

Taulukko 5. Malli 1: Yleistetty lineaarinen sekamalli (GLMM, Bernoulli-jakauma) todennäköisyydelle, että rauduskoivusta tehdään vaneritukkia (0 = ei tukkia, 1 = vähintään yksi tukki) metsämailla (2044 puuta) ja pelto- mailla (2640 puuta) sekä Malli 2: yleistetty lineaarinen malli (GLM, Bernoulli-jakauma) seitsemälle tutkimus- lohkolle. Taulukossa khii-arvot tyypin III Anova (devianssi) -testistä Mallin 1 kertoimille ja t-arvot Waldin testistä Mallin 2 kertoimille.

Muuttuja	Kerroin	Keskivirhe	Vapausasteet (df)	khii-arvo /t-arvo	p-arvo
Malli 1: Tukkirunkosaanto maaluokittain (GLMM), ROC: 0,911 (0,903–0,920)					
Vakio	-17,297	1,397	4675	-12,385	<0,001
Maaluokka (referenssiluokka = Metsämaa)	-	-	1	18,312	<0,001
- Peltomaa	6,747	1,577	5	4,277	0,008
$d_{1,3}$	0,794	0,063	4675	12,541	<0,001
Maaluokka $\times d_{1,3}$	-	-	1	23,192	<0,001
- Peltomaa $\times d_{1,3}$	-0,340	0,071	4675	-4,814	<0,001
Tutkimuslohkon satunnaistekijä	0,047				
Hajontaparametri	2,967				
Malli 2: Tukkirunkosaanto tutkimuslohkoittain ROC: 0,914 (0,906–0,922; 95 % CL)					
Vakio	-17,040	2,726	-	-6,252	<0,001
Tutkimuslohko (referenssiluokka = Pieksämäki 3)	-	-	6	35,258	<0,001
- Pieksämäki 4	0,248	3,302	-	0,075	0,940
- Uurainen 1	-1,579	4,057	-	-0,389	0,697
- Pieksämäki 1	6,697	2,951	-	2,269	0,023
- Pieksämäki 2	9,455	2,959	-	3,195	0,001
- Perho 1	4,124	3,389	-	1,217	0,224
- Uurainen 2	0,601	3,888	-	0,154	0,877
$d_{1,3}$	0,788	0,123	-	6,404	<0,001
Tutkimuslohko $\times d_{1,3}$	-	-	6	40,168	<0,001
- Pieksämäki 4	-0,019	0,149	-	-0,124	0,901
- Uurainen 1	0,063	0,185	-	0,338	0,735
- Pieksämäki 1	-0,328	0,132	-	-2,475	0,013
- Pieksämäki 2	-0,460	0,132	-	-3,484	0,001
- Perho 1	-0,220	0,152	-	-1,450	0,147
- Uurainen 2	-0,111	0,170	-	-0,654	0,513
Hajontaparametri	2,900				



Kuva 3. Mallilla 1 laskettu todennäköisyys (0,1) sille, että rungosta tehdään vaneritukkia (a) metsämaiden ja pelto- maiden istutuskoivikoiden pätehdäkuussa ja (b) vastaava malli tutkimuslohkoittain (metsämailla yhtenäisen viiva, peltomailla katkoviiva).

Taulukko 6. Lineaaristen sekamallien muuttujat, parametriestimaatit ja testit rauduskoivurunkojen toteutuneille tukki- ja ainespuuosien tilavuuksille hakkuuaineistossa sekä runkotilavuudelle sekä teoreettisille ainespuu- ja tukkitilavuuksille koela-aineistossa.

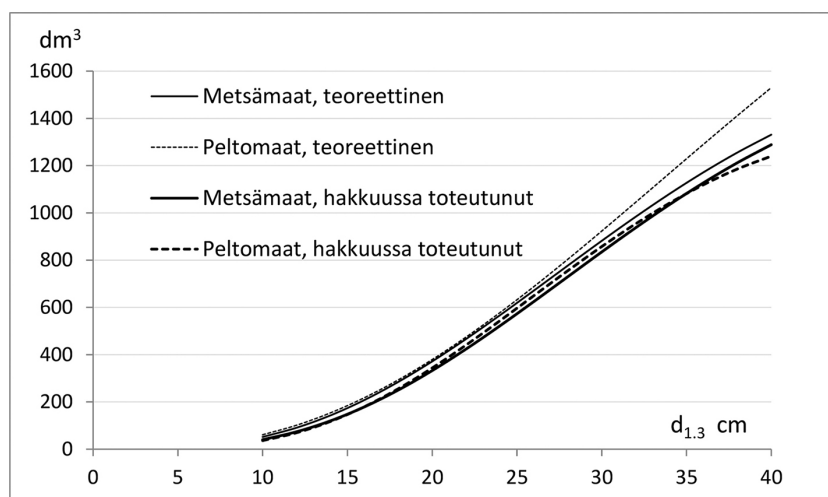
Muuttuja	Kerroin	Keskivirhe	Vapausasteet	t-arvo	p-arvo
Malli 3: Selitettävä = ln(toteutunut ainespuutilavuus), $N_{\text{metsämaa}} = 2044$ ja $N_{\text{peltomaa}} = 2640$					
Kiinteät vaikutukset					
Vakio	-5,060	0,204	4478	-24,788	0,000
Peltomaa	-1,058	0,251	4475	-4,208	0,000
$d_{1,3}$ (cm)	-0,075	0,005	4661	-14,857	0,000
$\ln(d_{1,3})$	4,126	0,102	4665	40,490	0,000
Peltomaa $\times d_{1,3}$	-0,021	0,006	4670	-3,446	0,001
Peltomaa $\times \ln(d_{1,3})$	0,505	0,124	4673	4,053	0,000
Satunnaisvaikutukset	Varianssi	Keskivirhe		Snowdon-	
Tutkimuslohko	0,0006	0,0004		kerroin:	
Jäännösvaihtelu	0,0286	0,0006		1,010	
Malli 4: Selitettävä = ln(toteutunut tukkitilavuus toteutuneissa tukkirungossa), $N_{\text{metsämaa}} = 1058$ ja $N_{\text{peltomaa}} = 1268$					
Vakio	-15,295	2,773	2317	-5,516	0,000
Peltomaa	-2,861	3,197	2318	-0,895	0,371
$d_{1,3}$ (cm)	-0,164	0,048	2315	-3,413	0,001
$\ln(d_{1,3})$	7,801	1,236	2316	6,313	0,000
Peltomaa $\times d_{1,3}$	-0,069	0,054	2316	-1,278	0,201
Peltomaa $\times \ln(d_{1,3})$	1,410	1,415	2316	0,997	0,319
Satunnaisvaikutukset	Varianssi	Keskivirhe		Snowdon-	
Tutkimuslohko	0,0096	0,0034		kerroin:	
Jäännösvaihtelu	0,1156	0,0064		1,058	
Malli 5: Selitettävä = ln(rungon kokonaistilavuus), $N_{\text{metsämaa}} = 1012$ ja $N_{\text{peltomaa}} = 1029$					
Vakio	-2,686	0,107	366	-25,070	0,000
Peltomaa	0,400	0,198	945	2,021	0,044
$d_{1,3}$ (cm)	-0,040	0,003	2030	-15,976	0,000
$\ln(d_{1,3})$	3,142	0,051	2030	62,120	0,000
Peltomaa $\times d_{1,3}$	0,009	0,004	2030	1,921	0,055
Peltomaa $\times \ln(d_{1,3})$	-0,182	0,094	2030	-1,940	0,053
Satunnaisvaikutukset	Varianssi	Keskivirhe		Snowdon-	
Tutkimuslohko	0,0037	0,0024		kerroin:	
Jäännösvaihtelu	0,0051	0,0002		1,002	
Malli 6: Selitettävä = ln(teoreettinen ainespuutilavuus), $N_{\text{metsämaa}} = 1012$ ja $N_{\text{peltomaa}} = 1028$					
Vakio	-4,209	0,110	415	-38,170	0,000
Peltomaa	1,238	0,204	1031	6,067	0,000
$d_{1,3}$ (cm)	-0,069	0,003	2030	-26,701	0,000
$\ln(d_{1,3})$	3,843	0,052	2030	73,483	0,000
Peltomaa $\times d_{1,3}$	0,026	0,005	2030	5,646	0,000
Peltomaa $\times \ln(d_{1,3})$	-0,580	0,097	2030	-5,967	0,000
Satunnaisvaikutukset	Varianssi	Keskivirhe		Snowdon-	
Tutkimuslohko	0,0036	0,0023		kerroin:	
Jäännösvaihtelu	0,0055	0,0002		1,002	
Malli 7: Selitettävä = teoreettinen tukkitilavuus $N_{\text{metsämaa}} = 755$ ja $N_{\text{peltomaa}} = 720$					
Vakio	-1159,45	21,910	22	-52,918	0,000
Peltomaa	-89,591	30,597	27	-2,928	0,007
$d_{1,3}$ (cm)	64,464	0,645	1470	99,977	0,000
Peltomaa $\times d_{1,3}$	4,397	0,937	1470	4,690	0,000
Satunnaisvaikutukset	Varianssi	Keskivirhe			
Tutkimuslohko	675,3	437,3			
Jäännösvaihtelu	3237,7	119,6			

Mallien 3 ja 4 mukaiset hakkuissa toteutuneet ainespuun ja tukkipuun runkokohtaiset tilavuudet on esitetty kuvissa 4 ja 5. Rinnankorkeudelta alle 25 cm:n paksuisten toteutuneiden tukkirunkojen tukkiosan tilavuudet eivät eronneet metsä- ja peltomailla, koska niistä saatiin käytännössä vain yksi vaneritukki silloin, kun tukkia tehtiin. Suuremmilla rungoilla tuli näkyviin peltomaan koivujen huonompi laatu siten, että aineiston järeimmistä, rinnankorkeudelta 40 cm:n rungoista saatiin tukkia keskimäärin 700 dm^3 , kun metsämailla vastaavista puista saatiin tukkia keskimäärin 1070 dm^3 . Ainespuun saannossa metsä- ja peltomaiden ero oli pieni, mutta tilastollisesti merkitsevä. Metsämailla ainespuusaanto oli isokokoisilla rungoilla suurempi kuin samankokoisilla puilla peltomailla, mutta keskikokoisilla rungoilla maaluokkien ero oli päinvastainen.

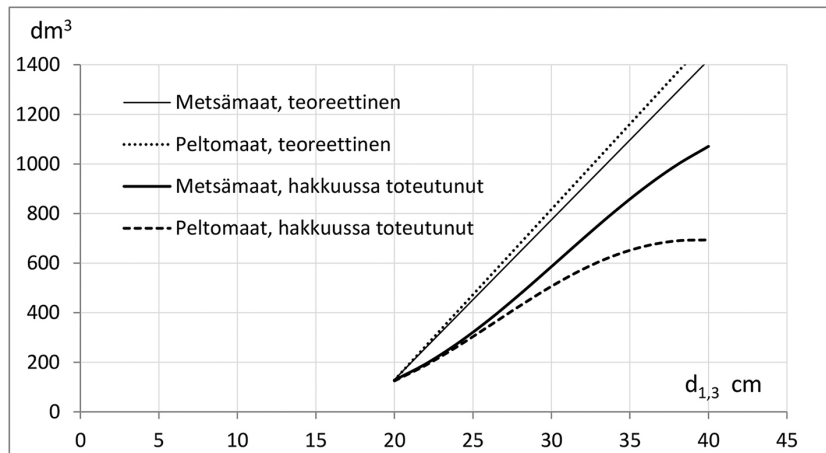
Koeala-aineistosta laadittiin vastaavat mallit runkojen kokonaistilavuudelle (Malli 5) ja teoreettiselle ainespuutilavuudelle (Malli 6) runkojen laatua huomioimatta, pelkkien dimensioiden perusteella (Taulukko 6). Teoreettinen ainespuutilavuus oli kookkailla, läpimitaltaan yli 25 cm:n puilla suurempi peltomailla kuin metsämailla (Kuva 4).

Koeala-aineiston tukkipuukokoisten ($d_{1,3} > 19,4 \text{ cm}$) puiden aineistossa teoreettinen tukki-tilavuus riippui mallin 7 mukaan suoraviivaisesti rinnankorkeusläpimitasta (Taulukko 6, Kuva 5). Runkojen dimensioiden perusteella peltomaiden koivuista tulisi enemmän tukkia kuin rinnankorkeudelta saman paksuisista koivuista metsämailla.

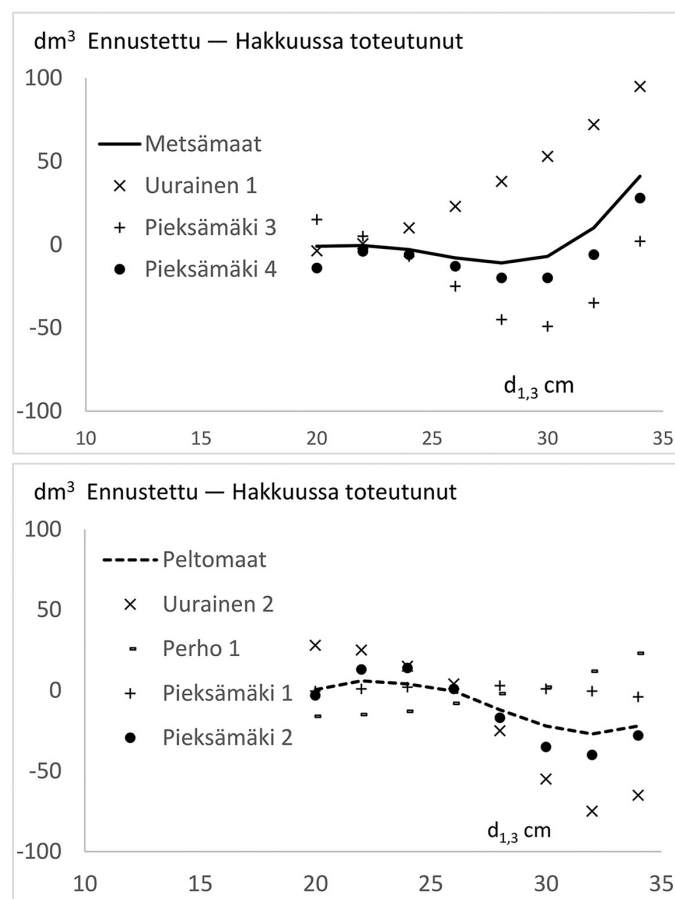
Mallin 4 ennuste poikkesi hakkuussa mitatusta tukkiosan tilavuudesta (residuaalit) keskimäärin 3,6 % metsämailla ja 4,3 % peltomailla. Ennustettu tukkisaanto oli keskimäärin lievä yliarvio alle 22–23 cm:n läpimittaisilla koivuilla ja lievä aliarvio läpimitaltaan 27–30 cm:n koivuilla (Kuva 6). Suurilla, yli 30 cm:n läpimittaisilla puilla malli oli harhattomampi peltomailla kuin metsämailla, joilla esiintyi systemaattista yliarviota etenkin yli 33 cm:n paksuisilla puilla. Tulos oli samansuuntainen kaikissa kolmessa metsikössä. Eniten harhaa esiintyi Uuraisten metsiköissä, joissa isojen koivujen laatu oli peltomaan kohteella mallin 4 ennustetta parempi ja metsämaan kohteella vastaavasti huonompi. Metsämaan tulos saattaa johtua yläharvennuksesta. Peltomaan tulos puolestaan voi johtua puuston suuresta tiheydestä, jolloin vain pieni parhaimmisto päävalta-puista on yltänyt tukkipuukokoon.



Kuva 4. Päätehakuissa toteutuvan rungon ainespuutilavuuden ennuste (Malli 3) verrattuna teoreettiseen, puun dimensioiden perustuvaan teoreettiseen ainespuutilavuuteen (Malli 6) metsä- ja peltomaiden istutusrauduskoivikoissa.



Kuva 5. Päätehakuissa toteutuvan tukkirungon tukkitilavuuden ennuste (Malli 4) verrattuna teoreettiseen, puun dimensioihin perustuvaan teoreettiseen tukkitilavuuteen (Malli 7) metsä- ja peltomaiden istutusrauduskoivikoissa.



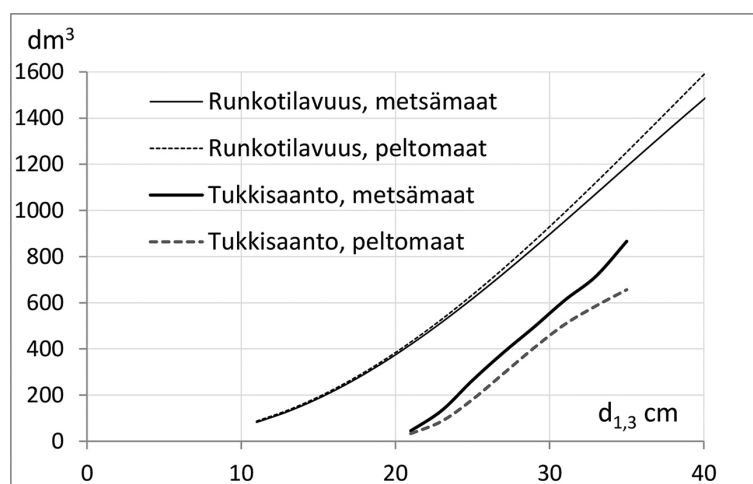
Kuva 6. Mallilla 4 ennustetun ja hakkuussa toteutuneen tukkiosan tilavuuden keskimääräinen erotus rinnankorkeusläpimitan funktiona tutkimuslohkoittain metsä- ja peltomailla.

3.3 Tukkien ja ainespuun saanto

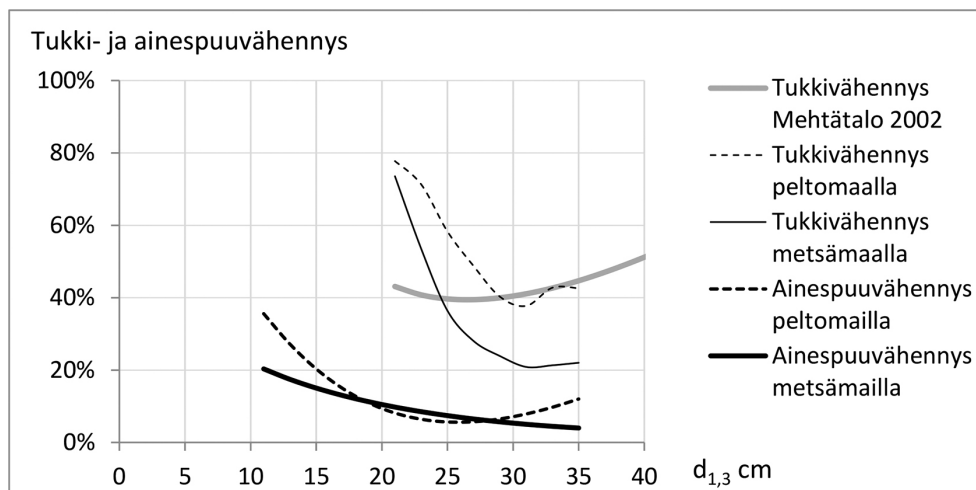
Vaneritukin saanto muodostui mallien 1 ja 4 yhteisvaikutuksesta: ensin raakattiin satunnaisesti mallin 1 mukaisella todennäköisyydellä tukkipuukokoisia ($d_{1,3} > 19,4$ cm) runkoja kuitupuurungoiksi ja sitten tukkirungoiksi valikoituneille puille ennustettiin tukkiosan tilavuus mallilla 4. Tulokset laskettiin koeala-aineistosta 2 cm:n läpimittaluokkien keskiarvoina (Kuva 7), kun mallin 1 mukainen satunnaistaminen toistettiin sata kertaa. Esimerkiksi toistojen kymmenkertaistaminen olisi vaikuttanut lopputulokseen hyvin vähän: sadalla toistolla laskettujen tukkisaantoennusteiden keskihajonta läpimittaluokkien sisällä oli metsämailla keskimäärin $0,4 \text{ dm}^3$ (0,3 %) ja peltomailla $1,4 \text{ dm}^3$ (0,6 %).

Ennustettu tukkisaanto rinnankorkeudelta 20 cm:n paksuisista rungoista oli keskiarvona lähellä nolaa, koska lähes kaikki niistä päätyivät pientenkin vikojen vuoksi kuiturungoiksi. Metsämailla todellinen tukkisaanto lisääntyi jokseenkin suoraviivaisesti läpimitan lisääntyessä, mutta peltomailla käyrä taittui alaspäin siten, että maaluokkien ero kasvoi suurempiin läpimittaluokkiin edetessä.

Tukkivähennys tarkoittaa prosenttiosuutta mitat täyttävästä teoreettisesta tukkitilavuudesta, jota ei puun laadun vuoksi tehdä tukiksi (Mehtätalo 2002). Mallien 1 ja 4 perusteella istutuskoivujen tukkivähennys oli rinnankorkeudelta yli 25 cm:n läpimittaisilla rungoilla 20–30 % metsämailla ja vastaavasti 40–55 % peltomailla (Kuva 8). Läpimittaluokan pienentyessä 21 cm:iin, tukkivähennys kohosi jyrkästi 70–80 prosenttiin. Tukkivähennyksen ohella laskettiin myös vastaava vähennys ainespuusaannolle. Tukkipuukokoisilla puilla se oli pieni, alle 10 %, mutta kuitupuukokoisilla rungoilla suurempi. Rinnankorkeusläpimitaltaan 10 cm:n koivuilla ainespuuvähennys oli metsämailla 20 % ja peltomailla 40 %. Runkovikojen ohella tähän vaikutti kuitupuun katkenta hakkuussa tasapituuteen 3 m, kun teoreettisessa ainespuutilavuudessa kuitupuun katkottiin vapaan pituisena (3–6 m). Runkokäyrien mukaan kuitupuun katkenta 3 m:n määrämittaan aiheutti teoreettisesti keskimäärin $8,2 \text{ dm}^3$:n vähennyksen rungon kuitupuusaantoon. Tämä kuitupuukokoisen rungon vajaakäyttö oli pienillä, alle 15 cm:n läpimittaisilla puilla keskimäärin 5 dm^3 ja suurilla, yli 22 cm:n läpimittaisilla puilla keskimäärin 10 dm^3 . Kuvan 8 ainespuuvähennyksestä noin viidesosa aiheutui kuitupuun katkonnasta määrämittaan.



Kuva 7. Istutuskoivikoiden päätehakuissa toteutuva tukkisaanto ennustettuna läpimittaluokittain (2 cm:n luokat) malleilla 1 ja 4 Koeala-aineistossa ja vastaava runkotilavuus laskettuna mallilla 5.



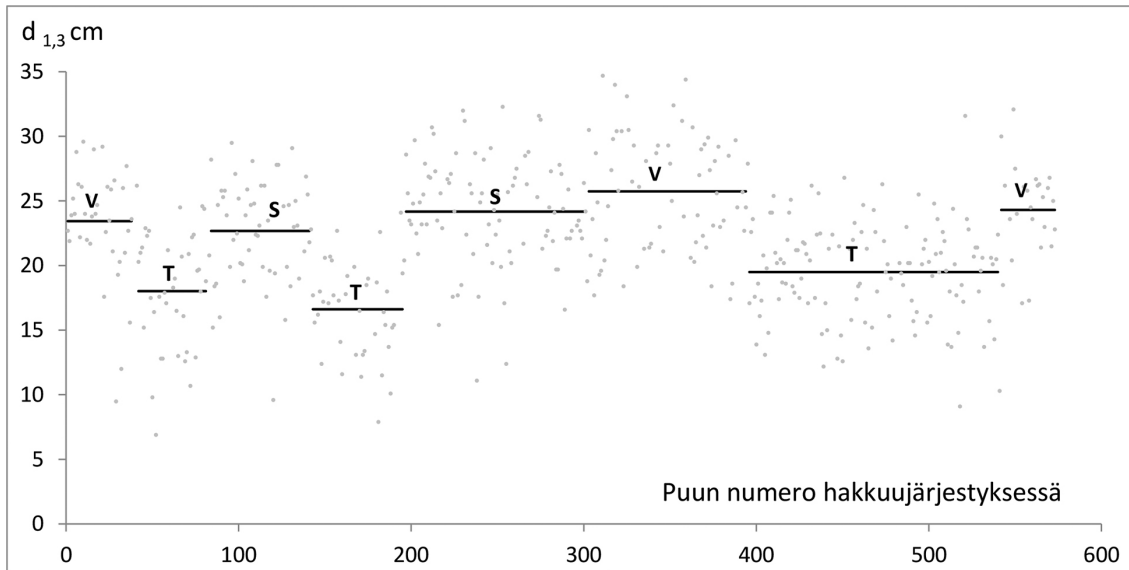
Kuva 8. Istutuskoivujen tukkivähennys-% päätehakkuussa laskettuna läpimittaluokittain (1 cm) Koeala-aineistossa mallien 1, 4 ja 7 avulla. Verrokkina luontaisesti syntyneiden rauduskoivujen tukkivähennysmallin ennuste maantieteellisesti vastaavissa olosuhteissa (Mehtätaalo 2002: ikä 50 v, pohj.koordinaatti 6920, korkeus 167 m merenpinnasta). Ainespuuvähennys-% perustuu puolestaan malleihin 3 ja 6.

3.4 Harvennuksen vaikutukset

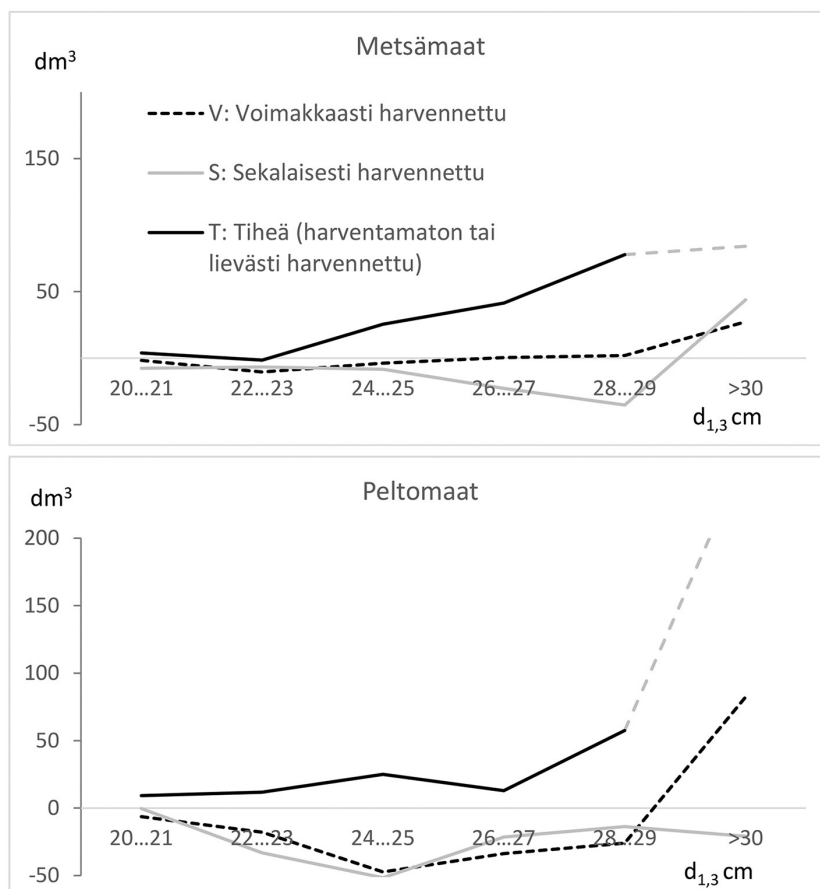
Päätehakuupuuston järeys ja läpimittajakuma riippuivat puuston harvennushistoriasta. Tutkimusaineisto sisälsi eri voimakkuuksilla harvennettuja koealoja, mutta päätehakkuita ei tehty koealoittain, vaan Tutkimuslohkoina, jotka sisälsivät useita koealoja ja niiden vaippavyöhykkeitä (Kuva 1). Voimakkaasti, keskimääräisesti tai lievästi harvennetut ja harventamattomat puustot poikkesivat keskiläpimitaltaan ja rakenteeltaan, mutta myös laadussa saattoi olla harvennusvalinnan aiheuttamia eroja, jotka vaikuttivat päätehakkuun tukkikertymään.

Harventamisen vaikutusta ennusteiden luotettavuuteen tutkittiin profiloimalla puiden hakkuujärjestyksen mukaiset läpimittasekvenssit manuaalisesti kolmeen harvennusluokkaan: V = Voimakkaasti harvennettu, T = Tiheä, joko harventamaton tai lievästi harvennettu ja S = Sekalaisesti harvennettu (Kuva 9). Profilointi perustui sekä liukuvan keskiläpimitan muutoksiin että läpimittajakauaman laajuuteen siten, että pieni keskiläpimitta indikoi tiheää puustoa ja suuri keskiläpimitta sekä pienten puiden vähyys voimakkaasti harvennettu aluetta. Edellisten välimaastoon asettuvat sekalaisesti harvennetut osuudet ovat joko keskimääräisesti harvennettuja alueita tai harvaksi käsiteltyjen ja tiheiden koealojen välisiä vaippavyöhykkeitä. Hakkuuaineistossa voimakkaan harvennuksen aritmeettinen keskiläpimitta oli 24,9 cm (1359 koivua, joista 90 % tukkipuukokoisia), sekalaisen harvennuksen 22,6 cm (1952 koivua, joista 80 % tukkipuukokoisia) ja tiheän puuston 19,4 cm (1374 koivua, joista 50 % tukkipuukokoisia).

Kolmelle harvennusprofiilille muodostettiin läpimittaluokittain keskiarvot ennustevirheelle, joka laskettiin teoreettisille tukkirungoille malleilla 1 ja 4 ennustettujen ja hakkuussa toteutuneiden tukkiosan tilavuuksien erotuksista (Kuva 10). Harventamattomissa tai hyvin lievästi harvennetuissa puustoissa mallien 1 ja 4 yhdessä aiheuttama yliarvio vaneritukin saannossa keskikokoisilla tukkipuilla oli noin 25 dm³ ja suurilla puilla yli 50 dm³. Tiheän puuston suurimpien puiden tulos (katkoviiva Kuvassa 10) on epävarma siksi, että havaintoja hakkuuaineistossa on vain 10 kpl kummassakin maaluokassa. Harvennetuissa puustoissa mallit 1 ja 4 yhdessä ennustivat tukkisaannon luotettavasti metsämailla, mutta peltomaiden keskikokoisissa tukkipuissa malli ennusti keskimäärin 50 dm³:n aliarvion, pienillä ja suurilla tukkipuilla vähemmän. Voimakkaasti tai sekalaisesti harvennettujen puustojen välillä ei ennusteen luotettavuudessa havaittu eroa.



Kuva 9. Esimerkki hakattujen koivujen läpimittasekvenssin profiloinnista kolmeen harvennusluokkaan metsikössä Perho 1: V = Voimakkaasti harvennettu, T = Tiheä (harventamaton tai hyvin lievästi harvennettu) ja S = Sekalaisesti harvennettu. Puiden läpimitat pisteinä ja ositteiden keskiläpimitat viivoina vaakatasoilla.



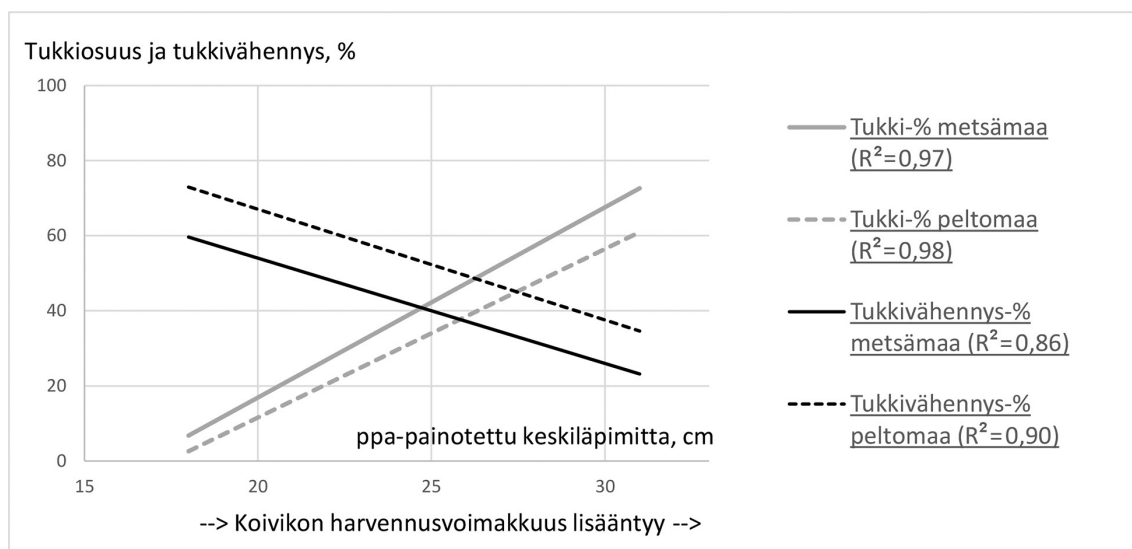
Kuva 10. Hakkuun läpimittasekvenssin profilointiin perustuvan harvennushistorian vaikutus mallien 1 ja 4 aiheuttaman ennustevirheeseen Hakkuuaineistossa (sadalla satunnaistamisella ennustetun runkokohtaisen tukkisaannon ja hakkuussa saadun kertymän erotusten keskiarvo läpimittaluokittain).

Tukin minimiläpimitan kohottaminen 20 cm:iin vähensi teoreettista tukkisaantoa 20–40 m³ ha⁻¹ tiheyteen 300–500 ha⁻¹ voimakkaasti harvennetuilla koelaloilla. Tiheyteen 700–900 ha⁻¹ lievästi harvennetuissa puustoissa vaikutus oli keskimäärin 60 m³ ha⁻¹. Vaikutusta tukkivähennys-%:iin ei voitu arvioida, koska hakkuussa katkenta tehtiin vain 18 cm:n minimiläpimitaan. Kuitupuun katkenta vapaan pituisena 6 cm:n minimiläpimitaan olisi lisännyt kuitupuukertymää 2–3 m³ ha⁻¹ voimakkaasti harvennetuilla koelaloilla ja harventamattomissa koivikoissa puolestaan 6–8 m³ ha⁻¹.

3.5 Puustotason ennustaminen

Edellä on tarkasteltu mallien avulla tukki- ja ainespuuosuuksia puun läpimitan funktiona. Käytännössä kertymiä ja laatuvehennyksiä tarvitaan kuitenkin metsikkötasolla, mikä edellyttää tulosten soveltamista erilaisissa puustoissa. Tätä varten mallien avulla ennustettiin vaneritukin osuutta kahden tutkimusaineistoon kuulumattoman harvennuskokeen puujoukoissa: Konginkangas 837 ja Suonenjoki 842 (Niemistö 1997). Pinta-alaltaan 1000 m²:n koelaloilla mallin 1 tukkipuennuste laskettiin keskiarvona sata kertaa toistetusta satunnaistuksesta. Mallien 1 ja 4 antamaa ennustetta korjattiin koelaloittain ja läpimittaluokittain Kuvan 10 mukaisilla ennustevirheillä. Voimakkaasti tai keskimääräisesti harvennetuilla koelaloilla korjaus tehtiin voimakkaiksi tai sekalaisiksi profiloitujen harvennusten keskiarvoilla.

Kuvassa 11 on tarkasteltu em. kokeissa eri voimakkuuksien harvennetuille koelapuustoille laskettuja vaneritukkiosuuksia ja tukkivähennyksiä puuston pohjapinta-alalla painotetun keskiläpimitan ($D_{1,3}$) funktiona. Tukkiosuuden ja tukkivähennys-%:n riippuvuudet keskiläpimitasta olivat suoraviivaisia ($a + b \times D_{1,3}$) ja hyvin voimakkaita niin metsämaalla kuin peltomaalla. Harventamattomilla koelalolla pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimita oli 18–20 cm ja tukkiosuus noin 10–15 %, kun taas voimakkaimmin harvennetuilla koelalolla keskiläpimita oli 28–30 cm ja tukkiosuus 50–70 % ainespuumäärästä.



Kuva 11. Puustotasolle malleilla 1 ja 4 ennustetun tukkiosuuden (% teoreettisesta ainespuutilavuudesta) ja tukkivähennyksen (% teoreettisesta tukkitilavuudesta) riippuvuus päätehakkuuikäisten istutuskoivikoiden keskiläpimitasta, joka ilmentää puuston harvennusvoimakkuutta. Käyrät on tasoitettu kahden tutkimusaineistoon sisällyttömän harvennuskokeen eri voimakkuuksien harvennettuja 25 koelalan aineistosta (Niemistö 1997): Metsämaan koe 837 MT:llä, ikä 50 v, 15 koelalaa, 995 puuta, runkoluku 200–1800 ha⁻¹. Peltomaan koe 842, ikä 47 v, 12 koelalaa, 632 puuta, runkoluku 360–1200 ha⁻¹.

Metsämaan kokeessa tukkivähennys pieni keskiläpimitan ja harvennusvoimakkuuden kohotessa, ollen harventamattomilla koealoilla noin 50–60 % ja voimakkaimmin harvennetuilla noin 30 %. Peltomaan kokeessa ennustettu tukkivähennys oli keskiläpimitasta riippumatta 12–13 % suurempi kuin metsämaan kokeessa.

4 Tulosten tarkastelu

Istutuskoivun runkojen laatu oli peltomailla huonompi ja tukkivähennys teoreettisesta tukki-tilavuudesta suurempi kuin metsämailla. Laatu vaihteli vähemmän metsämaakohteilla, joten tukkivähennyksen ennustaminen oli luotettavampaa kuin peltomailla. Rinnankorkeudelta yli 28 cm:n läpimittaisten puiden tukkivähennys oli metsämailla 20–25 %, mutta peltomailla keskimäärin 40 %. Pienemmissä läpimitoissa tukkivähennys suureni voimakkaasti ollen 20–22 cm:n läpimittaisilla puilla 70–80 %, koska hakkuussa suurin osa niistä raakattiin kuitupuuksi. Aikaisempien tutkimusten perusteella peltomaiden koivuissa esiintyy enemmän runkojen mutkaisuutta ja lenkoutta, oksavikoja ja puuaineen värivikaisuutta tai lahoisuutta kuin metsämailla (Niemistö ym. 1997; Hallaksela ja Niemistö 1998). Koivujen pahimmat lahot eivät sisälly tukki- ja ainespuuvähennyksiin tässä tutkimuksessa, koska niitä sisältävät puut jäivät pystyyn tai tallentumatta hakkuudataan.

Teoreettisesta ainespuutilavuudesta tehtävän ainespuuvähennyksen ero maaluokkien välillä oli pieni. Metsämailla se oli pienimmillä puilla 20 %, suurimmilla kuitupuukokoisilla puilla 10 % ja järeillä tukkipuilla alle 5 % johtuen pahojen runkovikojen lisäksi kuitupuun katkonnasta tasapituuteen 3 m. Teoreettinen kuitupuuosuus laskettiin vapaan pituisena. Metsämaita yleisempi vikaisuus lisäsi peltomailla ainespuuvähennystä etenkin läpimitaltaan alle 16 cm:n kuitupuilla ja myös järeillä tukkipuilla. Syynä lienevät jyrkät runkomutkat ja haarat, isoilla puilla myös paksujen oksien ryhmät, jotka keskeyttävät rungon käsittelyn, sekä tyvimutkan tai värivian aiheuttamat tyveykset suurilla puilla. Metsämaan koivuja hitaampi runkojen kapeneminen peltomailla lisäsi ilmeisesti ainespuusaantoa keskikokoisilla puilla, mutta pienimmillä kuitupuilla tämä saattoi lisätä määrämittaen katkonnahan aiheuttamaa hävikkiä.

Tutkimus tehtiin seitsemän rauduskoivikon päätehakkuussa 44–51 vuotta istutuksen jälkeen. Kohteet olivat pitkäaikaisia harvennuskokeita, jotka sisälsivät vaihtelevasti eri voimakkuuksilla harvennettuja koealapuustoja. Lähtökohtaisesti aineisto edusti onnistuneita ja alkukehitykseltään tasaisia viljavien metsä- ja peltomaiden koivuviljelyksiä, jotka siksi olivat laadultaankin todennäköisesti keskimääräistä parempia kuin 1970-luvun alussa paljasjuuritaimilla istutetut koivikot keskimäärin. Toisaalta harventamattomat tai lievästi harvennetut koealat toivat aineistoon hoitamattomuuden piirteitä ja laajensivat uudistamisikäisten puustojen koko- ja runkomuotojakaamaa. Harvennukset oli tehty pääosin tavanomaisina alaharvennuksina, joissa puun koon ja elinvoiman ohella on kiinnitetty huomiota myös kasvatettavien runkojen hyvään laatuun.

Harventamattomien tai lievästi harvennettujen koealojen vuoksi tutkimusaineisto ei sellaisenaan edustanut suositusten mukaan (Metsänhoitosuositukset, Tapio) voimakkaasti harvennettuja istutuskoivikoita, vaan se sisälsi runsaasti myös solakoita runkoja. Puuston ikä ja kasvupaikan viljavuus vaihtelivat aineistossa melko vähän, joten rungon suuri koko indikoi voimakasta harventamista ja pieni koko vielä selvemmin tiheänä kasvatusta, jossa myös puiden laatuvalinta on ollut vähäisempää. Hakattujen puiden läpimittaselvyyttä profiloimalla voitiinkin osoittaa mallien aiheuttama yliarvio tiheiden koivikoiden tukkikertymissä ja aliarvio harvennetuissa puustoissa peltomailla.

Tiheiden koealojen osalta tutkimuspuustoja voidaan pitää päätehakkuun kannalta keskenkasvuisena, vaikka ikä vastaa istutuskoivikoille suositeltua kiertoaikaa (Oikarinen 1983; Hynynen ym. 2010). Lisäksi aineistosta puuttuvat rinnankorkeudelta yli 40 cm:n läpimittaiset puut. Mehtätalon

(2002) mukaan tukkivähennysmallilta edellytetään puun ikääntymiseen liittyvän rappeutumisen ennustamista. Istutuskoivuilla tällaista ikää ei ole vielä saavutettu, joten tulosten soveltamisessa yli 50-vuotiaisiin ja yli 40 cm:n läpimittaisia koivuja sisältäviin puustoihin pitää olla varovainen.

Rajoituksistaan huolimatta tutkimusaineisto edustaa kuitenkin kohtuullisen hyvin 1960–1970-luvuilla istutettuja koivikoita, joita on hoidettu vaihtelevasti ja joiden kasvupaikka on sopiva rauduskoivulle, eikä puusto ole kärsinyt pahasti tuhoista. Erilaiset harvennusvoimakkuudet olivat tuottaneet rakenteeltaan monipuolisia päätehakkuupuustoja, ja pystyvuina mitattujen runkojen dimensiot tunnettiin tarkasti, mutta aineiston hankintatavan vuoksi niitä ei voitu puutasolla yhdistää suoraan hakkuudatan puihin.

Tukkisaanto rinnankorkeudelta 20 cm:n paksuisista koivuista oli lähellä nolaa (Kuva 7), koska suurin osa niistä päätyi pienehköjenkin vikojen vuoksi kuitupuurungoiksi. Tulokseen saattaa vaikuttaa sekin, että koneenkuljettajan on helpompi raakata pieni tukkirunko laatuvikojen vuoksi kokonaan kuitupuuksi kuin järeä runko. Taloudellinen menetys kuitupuuksi katkotuilla ohuilla tukkipuilla onkin pieni tai jopa olematon, mikäli kuitupuukelpoista runkoa menisi tukin katkonnan vuoksi hylkyyn.

Metsämailla toteutuneen tukkiosan tilavuus kasvoi jokseenkin suoraviivaisesti läpimitan kasvaessa, mutta peltomailla käyrä taittui alaspäin siten, että maaluokkien ero kasvoi rungon koon lisääntyessä (Kuva 7). Suurilla yli 30 cm:n paksuisilla koivuilla toteutunut tukkiosuus ainespuutilavuudesta oli metsämailla 60–70 %, mutta peltomailla maksimi oli 50 %. Metsämaiden suurimmilla koivuilla malli 4 aiheutti kuitenkin tukkiosuudessa yliarvion (Kuva 6). Havainnot viittaavat siihen, että tukkiosuuden kasvun taittuminen suurimmilla puilla aiheutui rungon lahoja värivioista. Näin siksi, että tukkiosan mutkaisuus tai muut muotoviat eivät iän myötä lisääntyneet, vaan niiden merkitys päinvastoin vähenee rungon järeytyessä. Syynä laho- ja värivikaisuuteen alle 50 vuoden iässä ei todennäköisesti ole vielä rauduskoivun rappeutuminen, vaan nuoruusvaiheessa syntyneiden infektioiden leviäminen (Hallaksela ja Niemistö 1998), jota puun vastustuskyvyn aleneminen iän myötä voi edistää.

Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI9 ja VMI10) koepuumittausten mukaan tukkivähennys on rauduskoivulla Etelä-Suomessa 30–40 %, kun kiertoaika on normaalin pituinen (Mehtätalo 2002). Varttuneita istutuskoivuja oli tuolloin hyvin vähän osumaan VMI-koepuiksi, joten kyse on lähes kokonaan luontaisesti syntyneistä rauduskoivuista, joista noin 70 % kasvoi tuolloin sekametsissä ja loput 30 % koivuvaltaisissa metsissä (Niemistö ja Korhonen 2008). Vuosikymmenten aikana luontaisen rauduskoivun laatu ei ollut paljon muuttunut. Heiskanen (1957) tutkimuksessa kolmannes rauduskoivun tuottamasta tukkikoisesta puutavarasta ei kelpannut laadun puolesta tukiksi.

Mehtätalon (2002) mukaan rauduskoivun tukkivähennys-% pienenee lievästi rinnankorkeusläpimitan kasvaessa 25–30 senttimetriin ja alkaa sen jälkeen kasvaa. Tässä tutkimuksessa sama ilmiö havaittiin peltomailla. Metsämailla tukkivähennys pieneni ainakin 35 cm läpimitaan saakka, mutta tätä isommista puista ei ollut riittävästi havaintoja (Kuva 8). Rungon laatu ei ajan myötä parane, vaikka dimensiot kasvavat. Lisäksi koivun lahoisuus ja värivikaisuus lisääntyvät ikääntymisen myötä.

Tässä tutkimuksessa istutuskoivujen laatu metsämaalla oli parempi, kuin em. tutkimusten luontaisesti syntyneillä koivuilla (Kuva 8). Peltomaiden istutuskoivuilla tukkivähennys oli puolestaan suurempi kuin luonnonkoivulla, mutta järeiden kasvaessa ero pieneni ja hävisi kokonaan yli 28 cm:n läpimittaluokissa. Tämän tutkimuksen pienimmillä tukkirungoilla tukkivähennys kuitenkin kohosi jyrkästi 70–80 prosenttiin. Aikaisemmissa tutkimuksissa (Heiskanen 1957; Mehtätalo 2002) tukkiosuus ei määräytynyt hakkuun, vaan runkojen mittauksen ja vika-arvioiden perusteella, mistä syystä dimensioiden perusteella tukkia sisältävä runko arvioitiin useammin tukkipuiksi kuin käytännön hakkuussa. Pienet tukit eivät ole haluttuja ja siksi niiden laatuvaatimuksia tulkitaan tiukemmin kuin isoilla tukeilla.

Rinnankorkeusläpimitasta ennustettu teoreettinen tukkiosan tilavuus oli peltomaiden koivikoissa korkeampi kuin metsämailla (Kuva 4). Tulos viittaa siihen, että peltomailla kasvavat rauduskoivut ovat vähemmän kapenevia kuin metsämailla, kuten on aikaisemminkin todettu (Niemistö 1996; Niemistö ym. 1997). Siten runkojen vikaisuuden aiheuttama tukkivähennys korostuu peltomailla, koska runkomuodon perusteella tukkia pitäisi kertyä enemmän kuin saman läpimittaisista puista metsämailla, mutta hakkuissa tukkia kertyi peltomailta vähemmän.

Ainespuuvähennys oli peltomailla samalla tasolla kuin metsämailla keskikokoisissa puissa, mutta suurempi aivan pienissä ja myös isoissa puissa. Syynä saattoi pienillä puilla olla peltomaan koivujen solakuus ja mutkaisuus (Niemistö ym. 1997), jotka aiheuttavat katkontahävikkiä ohuiden rungonosien käsittelyssä. Suurista koivuista tehtiin ilmeisesti värivikojen tai tyvimutkien vuoksi tyveyksiä tai jätettiin paksuoksaiset latvaosat käsittelemättä useammin peltomailla kuin metsämailla. Tyveyksiä voi kuitenkin puuttua aineistosta, mikäli niitä tehtiin ennen rungon mittauksen ja prosessoinnin aloitusta, jolloin myös rinnankorkeusläpimitaksi saatiin todellista pienempi lukema.

Käytännön metsätaloudessa tukkisaantoa on arvioitava leimikkotasolla, jolloin siihen vaikuttavat laatu- ja mittavaatimusten sekä runkovikojen ohella puuston keskikoko ja kokojakauma. Tässä tutkimuksessa puustotason laskelmat tehtiin soveltamalla malleja tutkimusaineistoon kuulumattomien harvennuskokeiden pystyvuustoon, jossa koivujen keskiläpimita (18–29 cm) ja kokojakauma riippuivat pääasiassa koealojen harvennushistoriasta. Lisääntyvä harvennusvoimakkuus tarkoitti tällöin läpimitan keskiarvon suurentumista ja hajonnan pienentymistä, ja lisäksi runkovikojen vähentymistä, koska huonot puut on poistettu harvennuksissa. Voimakkaasti harvennetuissa koivikoissa tukkiosuus oli 50–60 % kertymästä, mutta harventamattomissa vain 10–20 % (Kuva 11). Luvut ovat samalla tasolla kuin tutkimusaineistossa (Kuva 2).

Puustotasolla teoreettiseen tukkimäärään tehtävä tukkivähennys pieneni metsämailla keskiläpimitan suhteen suoraviivaisesti ollen harventamattomissa koivikoissa yli 50 % ja voimakkaasti harvennuissa alle 30 %. Peltomailla tukkivähennys oli 11–12 %-yksikköä suurempi.

Vaneritukin latvaläpimitan vaatimus on ollut pitkään 18 cm, mutta nykyisissä puukaupoissa se on usein 20 cm, mikä pienentää tukkikertymää entisestään. Läpimittavaatimuksen kiristyminen vähentää teoreettisia tukkipuita pienimmissä tukkipuuluokissa, joissa tukkivähennys on suuri, joten suuremmalla minimiläpimitalla voi olla tukkivähennystä pienentävä vaikutus, vaikka tukkikertymä sinänsä vähenee. Läpimittavaatimuksen kiristyminen vähentää voimakkaasti harvennettujen ja järeäksi kasvatettujen koivikoiden teoreettista tukkisaantoa 20–40 m³ ha⁻¹, lievemmin harvennetuissa enemmän.

Koivukuitupuulle yleinen katkonta 3-metriseksi vähentää latvaosasta saatavan kuitupuun määrää 5–10 dm³ vapaan pituiseen kuitupuuhun verrattuna, pienillä puilla vähemmän kuin isoilla. Vaikka koivutukin kantohinta on yli kaksinkertainen kuitupuuhun verrattuna (Luke Tilastopalvelut), katkonnassa tehdään laatuviikojen vuoksi lyhyen tyveyksen tai välileikon sijasta usein 3-metrinen kuitupuupölkky, mikä puolestaan vähentää tukkikertymää.

Aikaisemmissa tutkimuksissa (Oikarinen 1983; Niemistö 1997; Hynynen ym. 2010) ja käytännön ohjeissa (Metsähoitosuosituks) rauduskoivikoille suositellaan ensiharvennuksesta lähtien voimakkaampia harvennuksia kuin hieskoivikoille tai havupuustoille. Tämän tutkimuksen tulokset puoltavat istutuskoivikoissa entistäkin voimakkaampia harvennuksia, joiden puuvalinnassa korostetaan kasvatettavien puiden hyvää laatua, erityisesti pellonmetsitysaloilla.

Edellä todettuihin koivun katkontaan ja sen ohjaukseen liittyviin seikkoihin tarvitaan lisäselvityksiä. Suurempi tarve on kuitenkin koivikoiden kasvun ja tuotoksen ajantasaiselle tutkimustiedolle sekä kasvatusvaihtoehtojen ja kiertoaikojen taloudelliselle vertailulle, joissa runkojen laadun osalta voidaan käyttää hyväksi tämän tutkimuksen tuottamia malleja. Lisäksi tarvitaan tutkimusta myös nuoremmista, jalostetuilla paakkutaimilla istutetuista koivikoista, joiden kasvu ja laatu voivat poiketa tässä tutkituista vanhimmissa koivuviljelyksistä. Metsien uudistamisessa ja taimikonhoidossa koivun tuho- ja laaturiskeihin pitää kiinnittää entistä enemmän huomiota.

Tutkimusdatan avoimuus

Tutkimuksessa käytetty koeala-aineisto on saatavissa kirjoittajien luvalla Luonnonvarakeskuksen DataPuu-tietokannasta ja hakkuuaineisto Pentti Niemistöltä.

Kirjoittajien työnjako

Kirjoittajista Pentti Niemistö on vastannut tutkimuksen suunnittelusta, aineiston hankinnasta ja tulosten laskennasta ja raportoinnista. Ville Hallikainen on vastannut tilastollisten menetelmien soveltamisesta ja raportoinnista ja osallistunut tutkimusraportin viimeistelyyn.

Kiitokset

Kiitämme aineiston keruuseen osallistuneita Luken entisiä ja nykyisiä työntekijöitä: Eero Poutiaista, Timo Siitosta, Jaakko Miettistä ja Marja-Leena Kilpeläistä sekä käsikirjoitusta kommentoinutta Henrik Heräjärveä. Kiitämme myös tutkimusalueiden omistajaa UPM Metsää ja seuraavia metsäkoneyrityksiä: Metsä-Multia Oy (Multia), RV-Hänninen (Saarijärvi), Metsäkoneet Valtoaho (Karstula). Erityiskiitoksen perusteellisesta ja ansiokkaasta tarkastustyöstä ansaitsevat prof. Lauri Mehtätalo ja toinen, nimettömäksi jäänyt referee.

Rahoitus

Tutkimus on rahoitettu kokonaan Luonnonvarakeskuksen budjettirahoituksella.

Lähteet

- Cameron AD, Dunham RA, Petty JA (1995) The effects of heavy thinning on stem quality and timber properties of silver birch (*Betula pendula* Roth). *Forestry* 68: 275–285. <https://doi.org/10.1093/forestry/68.3.275>.
- Fawcett T (2006) An introduction to ROC analysis. *Pattern Recogn Lett* 27: 861–874. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>.
- Hallaksela A-M, Niemistö P (1998) Stem discoloration of planted silver birch. *Scand J For Res* 13: 169–176. <https://doi.org/10.1080/02827589809382973>.
- Heinonen J (1994) Koealojen puu- ja puustotunnusten laskentaohjelma KPL. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 504. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1369-7>.
- Heiskanen V (1957) Raudus- ja hieskoivun laatu eri kasvupaikoilla. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja* 48. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171080>.
- Heiskanen V (1966) Tutkimuksia koivujen vikaisuuksista, niiden vaikutuksesta sorvaustulokseen sekä niiden huomioonottamisesta laatuluokituksessa. *Acta For Fenn* 80. <https://doi.org/10.14214/aff.7165>.
- Heräjärvi H (2001) Technical properties of mature birch (*Betula pendula* and *B. pubescens*) for saw milling in Finland. *Silva Fenn* 35: 469–485. <https://doi.org/10.14214/sf.581>.
- Heräjärvi H (2002) Modelling of internal knot characteristics of mature Finnish *Betula pendula* and *Betula pubescens*. In: IUFRO Fourth Workshop, Connection between forest resources

- and wood quality: modelling approaches and simulation software. Harrison Hot Springs, Canada, s. 85–93.
- Hynynen J, Niemistö P, Viherä-Aarnio A, Brunner A, Hein S, Velling P (2010) Silviculture of birch (*Betula pendula* Roth and *Betula pubescens* Ehrh.) in northern Europe. *Forestry* 83: 103–119. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpp035>.
- Hytönen J, Saramäki J, Niemistö P (2014) Growth, stem quality and nutritional status of *Betula pendula* and *Betula pubescens* in pure stands and mixtures. *Scand J For Res* 29: 1–11. <https://doi.org/10.1080/02827581.2013.838300>.
- IBM Corp (2018) IBM SPSS statistics for Windows, version 25.0. IBM Corp., Armonk, NY. https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/en/SSLVMB_25.0.0/. Viitattu 17.1.2019.
- Jalkanen A (2001) Metsikön lahoisuuden ennustaminen Etelä-Suomessa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2001: 461–463. <https://doi.org/10.14214/ma.6685>.
- Laasasenaho J (1982) Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Männy, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. *Commun Inst For Fenn* 108. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0589-9>.
- Luonnonvarakeskus Tilastopalvelu. <https://stat.luke.fi/>.
- Mehtätalo L (2002) Valtakunnalliset puukohtaiset tukkivähennysmallit männylle, kuuselle, koivuille ja haavalle. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2002: 575–591. <https://doi.org/10.14214/ma.6196>.
- Mäkinen H, Ojansuu R, Niemistö P (2003) Predicting external branch characteristics of planted silver birch (*Betula pendula* Roth) on the basis of routine stand and tree measurements. *Forest Sci* 49: 301–317.
- Niemistö P (1995a) Influence of initial spacing and row-to-row distance on the crown and branch properties and taper of silver birch (*Betula pendula*). *Scand J For Res* 10: 235–244. <https://doi.org/10.1080/02827589509382889>.
- Niemistö P (1995b) Influence of initial spacing and row-to-row distance on the growth and yield of silver birch (*Betula pendula*). *Scand J For Res* 10: 245–255. <https://doi.org/10.1080/02827589509382890>.
- Niemistö P (1996) Yield and quality of planted silver birch (*Betula pendula*) in Finland – preliminary review. *Norwegian Journal of Agricultural Sciences* 24: 5–64.
- Niemistö P (1997) Ensiharvennuksen ajankohdan ja voimakkuuden vaikutus istutetun rauduskoivikon kasvuun ja tuotokseen. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/1997: 439–454. <https://doi.org/10.14214/ma.6232>.
- Niemistö P (2008) Koivun uudistaminen. Koivikon kasvatusta. Julkaisussa: Niemistö P, Viherä-Aarnio A, Velling P, Heräjärvi H, Verkasalo E (toim) Koivun kasvatusta ja käyttöä. Metla ja Metsäkustannus, s. 73–95, s.96–136. ISBN 978-952-5694-12-3.
- Niemistö P, Korhonen K (2008) Koivuvarat ja kasvu. Julkaisussa: Niemistö P, Viherä-Aarnio A, Velling P, Heräjärvi H, Verkasalo E (toim) Koivun kasvatusta ja käyttöä. Metla ja Metsäkustannus, s. 175–181. ISBN 978-952-5694-12-3.
- Niemistö P, Hukka P, Verkasalo E (1997) Kasvupaikan ja puuston tiheyden vaikutus rauduskoivun ulkoiseen laatuun 30-vuotiaissa istutuskoivikoissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1997: 349–374. <https://doi.org/10.14214/ma.6476>.
- Näslund M (1936) Skogsförsöksanstaltens gallringsförsök i tallskog. *Meddelanden från Statens Skogsförsöksanstalt* 28.
- Oikarinen M (1983) Etelä-Suomen viljeltyjen rauduskoivikoiden kasvatustavat. *Commun Inst For Fenn* 113. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-0619-4>.
- R Core Team (2018) R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- Raulo J (1979a) Rauduskoivujälkeläistöjen rungon laatu Etelä- ja Keski-Suomessa. *Commun Inst*

- For Fenn 97. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-metla-201207171127>.
- Raulo J (1979b) Suomen ensimmäinen laaja rauduskoivun viljelykokeilu. Teollisuuden metsäviesti 1: 18–19.
- Robin X, Turck N, Hainard A, Tiberti N, Lisacek F, Sanchez J-C, Müller M (2011) pROC: an open-source package for R and S+ to analyze and compare ROC curves. BMC Bioinformatics 12, artikkelitunnus 77. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-12-77>.
- Räty M (2021) Poiminta tietokannasta, Valtakunnan metsien inventointi, VMI12.
- Snowdon P (1991) A ratio estimator for bias correction in logarithmic regression. Can J For Res 21: 720–724. <https://doi.org/10.1139/x91-101>.
- Venables WN, Ripley BD (2002) Modern applied statistics with S, 4. painos. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0.
- Verkasalo E (1997) Hieskoivun laatu vaneripuuna. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 632. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1555-X>.
- Viherä-Aarnio A, Velling P (1999) Growth and stem quality of mature birches in a combined species and progeny trial. Silva Fenn 33: 225–234. <https://doi.org/10.14214/sf.659>.
- Viherä-Aarnio A, Velling P (2008) Siemen- ja taimihuolto. Julkaisussa: Niemistö P, Viherä-Aarnio A, Velling P, Heräjärvi H, Verkasalo E (toim) Koivun kasvatusta ja käyttö. Metla ja Metsäkustannus, s. 55–72. ISBN 978-952-5694-12-3.
- Wickham H (2016) ggplot2: elegant graphics for data analysis. Springer-Verlag, New York. https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4_9.

36 viitettä.