

This is an electronic reprint of the original article.

This reprint *may differ* from the original in pagination and typographic detail.

Author(s): Jouni Siipilehto

Title: Taimikoiden tila valtakunnan metsien 11. inventoinnin mukaan ja biometriset mallit eritasoisilla lähtötiedoilla

Year: 2021

Version: Published version

Copyright: The Author(s) 2021

Rights: CC BY-SA 4.0

Rights url: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

Please cite the original version:

Siipilehto J. (2021). Taimikoiden tila valtakunnan metsien 11. inventoinnin mukaan ja biometriset mallit eritasoisilla lähtötiedoilla. Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2021 artikkeli id 10421. <https://doi.org/10.14214/ma.10421>

All material supplied via *Jukuri* is protected by copyright and other intellectual property rights. Duplication or sale, in electronic or print form, of any part of the repository collections is prohibited. Making electronic or print copies of the material is permitted only for your own personal use or for educational purposes. For other purposes, this article may be used in accordance with the publisher's terms. There may be differences between this version and the publisher's version. You are advised to cite the publisher's version.



Jouni Siipilehto

Taimikoiden tila valtakunnan metsien 11. inventoinnin mukaan ja biometriset mallit eritasoisilla lähtötiedoilla

Siipilehto J. (2021). Taimikoiden tila valtakunnan metsien 11. inventoinnin mukaan ja biometriset mallit eritasoisilla lähtötiedoilla. Metsätieteen aikakauskirja 2021-10421. Tutkimusartikkeli. 30 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10421>

Tiivistelmä

Tutkimuksessa tarkasteltiin vuosina 2009–2013 mitatun valtakunnan metsien 11. inventoinnin (VMI11) pienten ja varttuneiden taimikoiden tilaa ja laadittiin mallit kokonaisrunkoluvun, lehtipuuosuuden ja keskipituuden iänmukaisesta kehityksestä. Logaritmisista taimikon tiheyttä ja keskipituutta kuvattiin lineaarisella regressiolla ja lehtipuuosuutta logistisella regressiolla. Vaihtoehtoisia malleja laadittiin eri lähteistä saatavan tiedon pohjalta. Vaihtoehtoina olivat 1) avoimien tietolähteiden maaperäkartta ja topografiset kosteustunnukset, 2) edelliset tunnukset VMI11-aineiston kasvupaikkatunnuksilla täydennettynä ja 3) ns. ”täydellinen tieto”, jossa edellisten lisäksi tunnettiin taimikonhoitotoimenpiteet ja niiden ajoitus. Kaikissa vaihtoehtoisissa oletettiin tunnettavan uudistamistapa, pääpuulaji ja toimenpiteet vähintään tasolla muokattu/muokkaamaton ja ojitettu/ojittamaton. Vaihtoehtoisissa 1 ja 2 taimikon tiheys kuvattiin hoitamattomien taimikoiden kasvupaikan potentiaalista tiheyttä kuvaavina tunnuksina (kokonaisrunkoluku ja lehtipuuosuus). Vaihtoehtoisissa 3 koko aineisto toimenpiteiden vaikutuksineen oli mallinnuksen kohteena. Avoimesta tiedosta VMI11-aineiston kasvupaikan kuvaukseen siirryttäessä taimikon runkoluvun selitysaste kohosi 16,6 %:sta 19,0 %:iin. ”Täydellisen tiedon” avulla runkoluvun selitysaste oli 22,5 %. Keskipituuden iänmukainen kehitys kuvattiin erikseen havu- ja lehtipuustolle vain vaihtoehdon 3 lähtötiedoilla ja niiden selitysasteet olivat 87 % ja 63 %. GTK:n maaperätunnuksia verrattiin VMI11-aineiston maaperätunnuksiin ja valuma-alueen topografiaan perustuvaa kosteusindeksiä verrattiin VMI11-aineiston kasvupaikkaan ja topografiseen luokkaan. Topografinen kosteusindeksi osoittautui VMI11-aineiston topografista luokkaa merkitsevämmäksi selittäjäksi ja lopulta se oli selittäjänä kaikissa malleissa. Turvemaat mallitettiin yhdessä kivennäismaiden kanssa käyttämällä turvemaiden kasvupaikkaa ja ojitustilannetta kuvaavia tunnuksia. Turve- mailla taimikon kokonaisrunkoluku lisääntyi nopeasti ojituksen jälkeen taimettumisolosuhteiden parantuessa. Taimikon tiheyden ja lehtipuuosuuden nopea kasvu hoitotoimenpiteen jälkeen oli selvästi erottuva ominaisuus. Laadittuja malleja voidaan hyödyntää sellaisenaan ennustamaan taimikon tiheyttä, havu- ja lehtipuuston määrää ja keskipituutta tai ne voivat olla perustana esim. laserkeilausta hyödyntäville kalibrointimalleille. Tutkimus liittyi MMM:n rahoittamaan hankkeeseen ”Taimikoiden tiedonkeruun kehittäminen”.

Asiasanat keskipituus; lehtipuuosuus, runkoluku; taimikonhoito

Yhteystiedot Luonnonvarakeskus (Luke), Luonnonvarat, Helsinki

Sähköposti jouni.siipilehto@luke.fi

Hyväksytty 4.2.2021

1 Johdanto

Taimikoiden erilaisten tunnusten suuri vaihtelu tekee näiden tunnusten ennustamisesta hyvin haastavaa. Taimikkoon syntyvän puuston pituuteen, tiheyteen ja puulajisuhteisiin vaikuttaa kasvupaikan ominaisuuksien suuri kirjo kivennäismailta turvemaille sekä erilaiset metsänuudistamisketjut (Uotila ym. 2011). Uudistamisketjuihin vaihtelua tuovat erilaiset maanmuokkaustavat (Luoranen ym. 2007; Uotila ym. 2010). Uudistaminen voi perustua luontaiseen uudistamiseen tai keinolliseen uudistamiseen kylvämällä tai istuttamalla. Taimikonhoidolla vaikutetaan taimikon tiheyteen ja puulajisuhteisiin (esim. Saksa ym. 2016). On kuitenkin väistämätön tosiasia, ettei taimikon tiheys hoitotoimenpiteen jälkeen ole pysyvä tila. Lehtipuut vesovat ja useilla puulajeilla vesojen alkukehitys on myös hyvin nopeaa (Björkdahl 1983; Johansson 1992; Hytönen ja Kauppi 2000; Lehtosalo ym. 2010). Vesojen pituuskasvu taantuu siemensyntyistä nopeammin, mutta siemensyntyiseltä taimelta voi silti mennä 15–20 vuotta, ennen kuin se saavuttaa samanikäisen vesan pituuden (Ferm 1990).

Taimikoiden tilaa kuvattaessa oleellisimpia taimikonhoidon kannalta ovat taimikon kokonaisrunkoluku sekä havupuuston ja lehtipuuston osuudet ja pituudet taimikon eri kehitysvaiheissa. Valtaosin suomalaiset taimikot ovat viljeltyjä havupuuvaltaisia taimikoita (Korhonen ym. 2010). Näihin syntyy luontaista ja vesasyntyistä lehtisekapuustoa hyvinkin runsaasti (Miina ja Saksa 2008, 2013; Siipilehto ym. 2015). Taimettumisalttiutta ja taimien menestymistä on kuvattu kasvupaikan, maalajin, maannoksen, maaperän kosteuden ja muokkauksen avulla (esim. Levula ym. 2004; Miina ja Saksa 2006, 2013) ja joskus myös sadantaa ja topografisia tunnuksia käyttäen (Järvenpää 2016). Sekapuuston osuus sekä havu- ja lehtipuuston pituussuhteet ovat oleellisia tietoja taimikonhoidon tarpeellisuudesta (Uotila ym. 2012; Miina ym. 2018). Taimikonhoidon tarpeellisuutta voi lähestyä taimikon tilaa kuvaavilla puustotunnuksilla (esim. Siipilehto ym. 2015) tai mallittamalla suoraan maastossa arvioitua taimikonhoidon tarpeellisuutta ja/tai kiireellisyyttä kasvupaikan ja taimikon tiheys- ja pituustunnuksilla (Uotila ym. 2012; Miina ym. 2018) tai mallittamalla vastaavia tunnuksia laserkeilausaineiston ja ilmakuvien avulla (Korhonen ym. 2013). Taimikonhoitotarvetta on arvioitu myös VMI:n metsävarakartan pituus- ja lehtipuusuusestimaatin pohjalta (Pesonen ym. 2007). Taimikon puustotunnuksille tehdyt mallit sisälsivät yleensä runkoluvun, keski- ja/tai valtapituuden ja mallit on laadittu lineaarisina malleina logaritmuunnoksen jälkeen (Hyppönen ym. 2002; Saksa ym. 2005; Siipilehto ym. 2015; Järvenpää 2016), mutta myös epälineaarisista malleista on esimerkkejä (Valkonen 1997; Huuskonen ja Miina 2007).

Tutkimus liittyy MMM:n rahoittamaan hankkeeseen ”Taimikoiden tiedonkeruun kehittäminen”. Tutkimuksen tavoitteena oli (1) karttapohjaisten kasvupaikkaa kuvaavien tunnusten luotettavuuden arviointi, (2) erilaisten taimikoiden tunnusmuuttujien iänmukaisen kehityksen kuvaaminen VMI11-aineiston perusteella ja (3) niiden selittäminen eritasoisilla lähtötiedoilla sekä (4) eri lähtötietoaineistoihin perustuvien mallien vertailu. Oletettiin, että avointen karttapohjaisten tietolähteiden kosteusindeksien ja maaperätunnusten avulla pystytään kuvaamaan taimikoiden tilaa. Lisäksi oletettiin, että lähtötietojen tarkentuessa biometrinen mallien luotettavuus paranee. Laaditut biometriset mallit kattoivat kokonaisrunkoluvun, lehtipuusuuden ja keskipituuden kaikilla metsämaan kasvupaikoilla koko Suomessa.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 VMI11-aineiston otanta-asetelma

VMI11-aineiston otanta perustuu ryväotantaan, jossa otannan intensiteetti laskee eli rypäiden välinen etäisyys kasvavaa etelästä pohjoiseen (VMI11 maastotyöohje 2009). Ryvä on joko kertaryvä tai pysyväryvä. Kertaryvä on aina L-muotoinen ja siihen on sijoitettu 9–12 kertakoealaa 300 m:n välein. Pysyväryvä on yleensä L-muotoinen ja siinä on tai 10–11 pysyvää koealaa 250–300 m:n välein. Suurin pysyvien koealojen määrä (14) selittyy poikkeuksellisella rypään muodolla, joka on avoin suorakaide Väli-Suomessa. Rypäät ovat 6 km:n etäisyydellä toisistaan Etelä-Suomessa, 7 km:n etäisyydellä Väli-Suomessa, Kainuussa ja Pohjois-Pohjanmaalla ja 10 km:n etäisyydellä toisistaan Lapissa ja Kuusamossa (VMI11 maastotyöohje 2009). Jatkossa rypästä käytetään termiä lohko, joka on aineistossa kuvattu lohkon x- ja y-indeksin avulla. Nämä indeksit yhdistämällä (lohko = $1000 \times x\text{-indeksi} + y\text{-indeksi}$) kukin lohko identifioitui. Kun VMI11-aineistosta poimittiin vain taimikot, joiden sisään koeala mahtui kokonaisuudessaan, niin tällaisia taimikkokoealoja oli valtaosin vain yksi/lohko. Kun aineisto rajattiin lisäksi hoitamattomiin taimikoihin, niin 65 %:lla kaikkiaan 3135 lohkoista oli yksi koeala, 25 %:lla kaksi koealaa ja vain 10 %:lla lohkoista vähintään kolme koealaa. Vähintään kolme koealaa sisältäneet lohkot sijoittuivat suhteellisen tasaisesti koko maahan (lämpösumman vaihtelualueelle 660–1316 °Cvrk).

2.2 VMI11:n taimikoiden yleiskuva

Taimikoiden tilaa tarkasteltaessa aineistona oli lähtökohtaisesti kaikki vuosina 2009–2013 maastossa mitatut VMI11-aineiston kuviotiedot kehitysluokassa 2 (pieni taimikko, keskipituus alla 1,3 m) ja kehitysluokassa 3 (varttunut taimikko, keskipituus yli 1,3 m ja pääosalla puista rinnan- korkeusläpimitta alle 8 cm). Taimikoita oli yhteensä 6061. Kaksijaksoiset taimikot (891 kpl) olivat mukana, koska säästettyä ylispuustoa, siemenpuustoa tai verhopuustoa saattaa esiintyä taimikoissa yleisesti. Koealalla ryhmänjohtaja paikantaa koealakeskipisteen, määrittelee kuvattavan kuvion ja tekee kuviokuvauksen (VMI11 maastotyöohje 2009). Vallitsevan jakson runkolukujen määrittelyssä käytetään kuviolta tehtäviä runkolukumittauksia. Runkolukukoealoja (2,66 m säde) sijoitetaan 15 m:n välein 3–9 kappaletta taimikkokuviolle. Tasaisissa taimikoissa koealoja tarvitaan vähemmän kuin epätasaisissa. Ryhmänjohtaja käyttää mittaustuloksia vallitsevan puulajin määrittämiseen sekä keskipituuden ja runkoluvun määrittämiseen puulajeittain. Ryhmänjohtaja voi muuttaa runkolukumittauksista saatuja tuloksia, jos ne eivät vastaa kuvion todellisia runkolukuja (VMI11 maastotyöohje 2009). Runkoluvun kirjaustarkkuus on 100 ha^{-1} , kun runkoluku on alle 5000 ha^{-1} ja 500 ha^{-1} , kun runkoluku on vähintään 5000 ha^{-1} . Vaikka VMI:n kuviotieto kuvaa otokseen osunutta kuviota kokonaisuudessaan, mitataan maaperämuuttajat koalan sisältä (säde 12,5 m) neljästä mittauspisteestä. Koealalla on tarkat GPS koordinaatit eli koealan keskipiste, jonka avulla VMI11-aineistoon liitettiin avoimesta GTK:n maaperäkartasta (<https://gtkdata.gtk.fi/maankamara/>) pintamaan tunnuksia (Haavisto-Hyvärinen ja Kutvonen 2007). Mallitukseen otettiin mukaan vain taimikot, joilla oli myös GTK:n maaperätieto (6049 kpl). Aineistoa rajautui pois lähinnä Ahvenanmaalta. Lisäksi mallien ulkopuolelle jätettiin eksoottisten puulajien (esim. kontortamänty, *Pinus contorta* L.) tai muuten harvinaisten puulajien taimikot (esim. tervaleppä, *Alnus glutinosa* L.), joita oli yhteensä 15 kpl. Aineiston keskimääräinen lämpösumma (+5 °C kynnysarvolla, vertailujakso vuosilta 1971–2000) oli 1100 °Cvrk ja se vaihteli välillä 580–1360 °Cvrk. Keskimääräinen etäisyys mereen oli 120 km (0,1–280 km) ja keskimääräinen korkeus meren pinnan yläpuolella oli 130 m (0,1–415 m).

Taulukko 1. Havaintojen määrän jakaantuminen kasvupaikoittain päätyypin ja kasvupaikkaluokan (Etelä-Suomen metsätuotantialue) mukaan.

Kasvupaikkaluokka	OMaT	OMT	MT	VT	CT	CIT	Kallio
kangas	90	835	2605	1411	253	7	10
korpi	10	181	260	23	0	0	0
räme	0	7	41	210	88	4	0

Mallitusaineistossa oli pieniä taimikoita 2211 ja varttuneita taimikoita 3823. Taimikot sijaitsivat valtaosin kivennäismailla (5211 kpl). Turvemaataimikoista (824 kpl) korpia oli 474 ja rämeitä 350. Kasvupaikan viljavuus erosi hyvin selvästi näissä kasvupaikan päätyypeissä (Taulukko 1). Korvet olivat keskimäärin viljavampia kuin kivennäismaat ja rämeet karumpia. Esim. lehtojen ja lehtomaisten kasvupaikkojen (ruohoturvekankaiden) yhteenlaskettu osuus oli korvissa 40,3 %, kivennäismailla 17,8 % ja rämeillä 2 %. Rämeillä kuivien ja karujen kasvupaikkojen (varpu- ja jäkäläturvekangas) osuus oli 26,2 %, kun se kivennäismailla oli 5,1 %. Myös kasvatuskelvottomat taimikot (kasvatuskelpoisten runkoluku = 0) olivat aineistossa mukana, mutta niitä oli vain 17 kpl ja vallitseva puulaji oli yleensä hieskoivu. Kivennäismailla näitä oli 9 ja turvemailla 8 kpl.

Hoitamattomat taimikot edustivat kasvupaikalle ominaista potentiaalista taimitiheyttä. Hoitamattomaksi luokiteltuja taimikoita oli yhteensä 4561. Taulukossa 2 on tarkasteltavat puustotunnukset koko aineistossa ja hoitamattomissa sekä hoidetuissa taimikoissa. Taulukossa ei ole tunnusten minimiarvoja, koska ne olivat nolliä eli aineistosta löytyi sekä puhtaita havupuutaimikoita että puhtaita lehtipuutaimikoita. Aineiston nuorin taimikko oli vain yksivuotinen ja vanhin (Ranualla) peräti 66 vuotta vanha (Taulukko 2).

Havu- tai lehtipuuvaltaisuus määräytyy sen mukaan, kumpaa on yli puolet kasvatettavien taimien runkoluvusta. Vallitseva puulaji määräytyy havu- tai lehtipuuvaltaisuuden perusteella. Pääpuulaji on se havu- tai lehtipuulaji, jonka osuus kasvatettavien taimien runkoluvusta on suurin. Vajaatuottoisessa taimikossa vallitseva puulaji arvioidaan taimijoukosta, joka taimikkoon jäisi kasvamaan, jos taimikko harvennettaisiin tasaväliseksi taimikon normaaliin tiheyteen (VMI11 maastotyöohje 2009). Aineiston havaintojen määrät vallitsevan puulajin mukaan olivat: mänty

Taulukko 2. Taimikoiden ikä (v), puustotunnukset (N = runkoluku, ha⁻¹ ja H = keskipituus, dm) ja lehtipuuosuus sekä hoidetuissa että hoitamattomissa havupuuvaltaisissa ja lehtipuuvaltaisissa taimikoissa.

	hoidetut havupuuvaltaiset n = 1371				hoitamattomat havupuuvaltaiset n = 4244			
	keskiarvo	hajonta	minimi	maksimi	keskiarvo	hajonta	minimi	maksimi
N havupuu	2654,6	1832,7	500	38000	3333,5	2852,4	150	68000
H havupuu	33,0	14,3	4	85	17,6	14,8	0,9	93
N lehtipuu	4240,9	6155,4	0	59300	5702,8	6710,2	0	72000
H lehtipuu	23,2	21,0	0	135	16,4	17,1	0	200
lehtipuuosuus	0,42	0,32	0	0,976	0,49	0,34	0	0,998
ikä	13,7	5,2	3	46	10,0	7,3	1	63

	hoidetut lehtipuuvaltaiset n = 102				hoitamattomat lehtipuuvaltaiset n = 317			
	keskiarvo	hajonta	minimi	maksimi	keskiarvo	hajonta	minimi	maksimi
N havupuu	577,8	946,2	0	8000	474,4	612,2	0	4000
H havupuu	21,9	17,8	0	61	15,3	17,48	0	84,1
N lehtipuu	6183,3	6718,4	350	31950	9587,0	10161,8	100	99000
H lehtipuu	52,6	21,0	6	99	37,7	22,4	1,1	99
lehtipuuosuus	0,88	0,14	0,33	1,00	0,93	0,11	0,30	1,00
ikä	14,3	5,2	4	30	11,4	7,0	1	66

(*Pinus sylvestris* L.) 3170, kuusi (*Picea abies* (L.) Karst.) 2445, rauduskoivu (*Betula pendula* Roth) 241 ja hieskoivu (*B. pubescens* Ehrh.) 151.

Taimikoiden synty tapa arvioidaan maastoinventoinnissa ja sen mukaan 48 % taimikoista oli istutettuja, 32 % oli luontaisesti syntyneitä taimikoita, 19 % kylvettyjä ja 1 % (vain 38 kpl) oli vesasyntyisiä. Istutustaimikoissa hoidettujen taimikoiden osuus oli suurin, 28 %. Kylvetyistä taimikoista hoidettuja oli 25 % ja luontaisista taimikoista 18 %.

Taimikonhoitotoimista varsinkin varhaisperkausta voi olla vaikea erottaa vuosien jälkeen toimenpiteestä, koska pienet kannot lahoavat nopeasti. Varttuneemman taimikon harvennus sen sijaan erottuu useita vuosia. Joka tapauksessa maastotyössä hoitotoimenpiteitä kirjattiin vain 24 %:lla inventoiduista taimikoista. Taimikonhoidon jälkeisen vesoitumisen vuoksi lehtipuuston tiheyden ero hoidetuissa (4375 ha⁻¹) ja hoitamattomissa (5974 ha⁻¹) taimikoissa oli suhteellisen pieni. Vastaavat havupuuston tiheydet olivat keskimäärin noin 2500 ja 3000 ha⁻¹.

VMI11-aineiston mukaan maanmuokkausta oli tehty lähes samassa suhteessa hoidetuissa ja hoitamattomissa taimikoissa. Koko aineistossa taimikoista oli muokattuja 74 %. Hoitamattomia taimikoita oli muokattu 73 % ja hoidettuja taimikoita 78 %. Hoidetuissa taimikoissa erityisesti pintamuokkauksen (äestys ja laikutus) osuus oli suurempi (60 %) kuin hoitamattomissa taimikoissa (50 %). Koko aineistossa yleisimmät muokkaustavat olivat äestys (32 %), mätästys (17 %) ja laikutus (16 %). Harvemmin käytetty auraus (4 %) sijoittui Pohjois-Suomeen.

Koska taimikoiden tunnukset vaihtelevat suuresti havu- tai lehtipuuvaltaisuuden ja taimikonhoidon mukaan, esitetään aineisto näissä luokissa (Taulukko 2). Havupuuvaltaisissa taimikoissa havupuuston keskipituus oli hieman lehtipuuston keskipituutta suurempi. Hoidetuissa taimikoissa havupuun ja lehtipuun pituuksien suhde oli suurempi kuin hoitamattomissa taimikoissa. Sen sijaan lehtipuuvaltaisissa taimikoissa havupuuston keskipituus oli vain noin puolet lehtipuuston keskipituudesta ja havupuuston runkoluku oli vain 500–600 ha⁻¹ (Taulukko 2). Tästä seurasi, että keskimääräiset lehtipuuprosentit olivat lehtipuuvaltaisissa taimikoissa erittäin korkeat (88–93 %). Lehtipuuston keskimääräinen runkoluku oli pienin hoidetuissa havupuuvaltaisissa taimikoissa, mutta silti niinkin korkea kuin 4200 ha⁻¹ ja lehtipuuosuus 42 % (Taulukko 2). Hoidetun havupuuvaltaisen taimikon lehtipuuprosentti poikkesi yllättävän vähän hoitamattoman havupuuvaltaisen taimikon lehtipuuprosentista (49 %). Silmiinpistävää oli, että kaikissa ositteissa lehtipuuston runkoluvun keskihajonta oli suurempi kuin keskiarvo eli variaatiokerroin CV > 1 (Taulukko 2).

2.3 Maalaji, kosteus ja topografia

VMI-koealan keskipisteestä 20 metrin säteeltä arvioitiin topografinen luokka (VMI11 maastotyöohje 2009). Luokat olivat: tasamaa, mäen laki tai rinteiden yläreuna, rinne, alarinne tai viettävä notko, notko (johon kerääntyy seisovaa vettä) ja muu, kun koealan pinnanmuoto ei yksiselitteisesti ole mikään edellisistä. VMI11-aineiston taimikoille haettiin topografinen kosteusindeksi (TWI eli Topographic Wetness Index). Indeksiksi perustuu valuma-alueelle mallitettuun veden liikkeeseen (Beven ja Kirkby 1979). TWI on laskettu samankokoisille 16 × 16 m:n hilaruuduille kuin Luonnonvarakeskuksen kansallisen metsävarainventaarion kartta-aineisto ja se on avoimesti saatavilla olevaa tietoa (Salmivaara 2016; Salmivaara ym. 2017). Virtaussuunnat ja virtaaman kerääntymisrasterit on laskettu menetelmällä, jossa veden kulku voi jakautua useammalle naapurirasterille (Tarboton 1997). Kosteusindeksin keskiarvo on TWI_MEAN ja kosteusindeksin vaihtelua kuvaavia tunnuksia olivat minimi (TWI_MIN), maksimi (TWI_MAX), hajonta (TWI_STD) ja vaihteluväli (TWI_RANGE). VMI11-koealoilla vaihtelu johtui siitä, että tunnus laskettiin useamman hilaruudun alueelta niiden pinta-alapainon mukaan ja samalla naapurihilojen välillä on ollut eroja TWI-tunnuksissa. Jos VMI11-koeala osuisi keskelle hilaruutua, koealan TWI-tunnuksessa ei olisi lainkaan vaihtelua. Tällaisia koealoja ei kuitenkaan aineistossa ollut, vaan TWI_STD oli pienimmillään 0,0055.

Maaperätunnukset arvioitiin maastossa 4 mittauspisteestä kiinteäsäteisen koealan sisältä (VMI11 maastotyöohje 2009). Vertailuksi taimikoille haettiin koealan sijainnin perusteella GTK:n maaperäkartasta (Haavisto-Hyvärinen ja Kutvonen 2007) pintamaan kuvaus. Maaperän peruskartoituksessa noudatetaan rakennusteknistä maalajiluokitusta, mikä vastaa maa- ja metsätaloudessa käytettävää maalajiluokitusta (Aaltonen ym. 1949). GTK:n maaperäkartoilta saatiin sekä pintamaan (0,4–0,9 m:n syvyys) että pohjamaan (yli 1 m:n syvyys) kuvaukset. Tässä tarkasteltiin vain pintamaan luokitusta, jota myöhemmin hyödynnettiin taimikon tunnuksia ennustettaessa. Usein pintamaan kuvaus oli niin pienipiirteistä, että VMI11-taimikkoealalle (GPS koordinaattipisteen ympäriltä 9 m:n säteellä rajattu alue) osui useampi pintamaalaji. GTK:n luokituksessa VMI11-koealoille löytyi lajittuneita maalajeja ja lisäksi lajittumattomista maalajeista oli kuvaus hienojakoinen tai karkearakeinen. VMI11-aineiston ja GTK:n maaperäkartan pohjalta tehtiin toisiaan vastaavia luokkia ja tarkasteltiin niiden yhdenmukaisuutta. Hienojakoisiin lajittuneihin maalajeihin sisältyi savi, hiesu ja hieno hieta. Karkeat lajittuneet maat olivat karkea hiekka ja sora. Samaan luokaan rinnastettiin GTK-luokituksen sekalajitteinen ja VMI11-luokituksen moreeni. Kivennäismaalajien lisäksi turvetta kuvaavia tunnuksia olivat GTK:n maaperäkartan soistuma, ohut turvekerros ja paksu turvekerros. Näistä soistumalla tarkoitettiin turvekerrosta, joka oli alle 30 cm, ohut tarkoitti 0,3–0,6 m:n turvekerrosta ja paksu yli 0,6 m:n turvekerrosta.

2.4 Taimikonhoito VMI11-aineistossa

Havu- ja lehtipuuvaltaiset taimikot poikkeavat hyvin paljon toisistaan. Aluksi tarkastellaan VMI11-aineiston havupuuvaltaisissa taimikoissa varhaisperkauksen ja taimikon harvennuksen vaikutusta havu- ja lehtipuiden runkoluku- ja pituussuhteisiin. Aineistosta laskettiin runkoluvun ja pituuden keskiarvoja pienissä ja varttuneissa taimikoissa ja mainittuja puustotunnuksia kuvattiin hoitotoimenpiteestä kuluneen ajan funktiona. Varhaisperkaukselle ja taimikon harvennukselle oli käytössä sama koodi ja siksi osa varttuneen taimikon toimenpiteistä voi tarkoittaa harvennuksen sijaan varhaisperkausta. Siksi perkausta kuvattaessa otettiin huomioon toimenpiteen ajoitus. Jos kyseessä oli varttunut taimikko, mutta hoitotoimenpide ajoittui korkeintaan 6 vuoden ikävaiheeseen, katsottiin toimenpiteen olleen varhaisperkaus eikä taimikon harvennus.

2.5 Menetelmät

Vaihtoehtoisia biometrisia malleja taimikon tilasta laadittiin eri lähteistä saatavan tiedon pohjalta: 1) avoimista karttapohjaisista tietolähteistä haetut maalajit ja kosteusindeksit, 2) edellisten lisäksi VMI11-maastotiedon kasvupaikkatunnukset ja 3) ”täydellinen tieto”, eli tunnettiin tarkasti muokkausmenetelmä, taimikonhoitotoimenpiteet ja viimeisen hoitotoimenpiteen ajankohta sekä viimeinen ojitustoimenpide ja sen ajankohta.

Vaihtoehdossa 1 käytetyt avoimet tietolähteet maaperästä ja kosteudesta olivat Geologian tutkimuslaitoksen (GTK) maaperäkartta ja kosteusindeksin sisältänyt Fairdata-palvelu (<https://etsin.fairdata.fi/>). Arvio maaperän kosteudesta saatiin hilaruuduille (16 m × 16 m) lasketuista kosteusindeksin arvoista. Käytetty indeksi oli TWI, eli topographic wetness index (ks. Salmivaara 2016). Kosteusindeksit olivat keskenään voimakkaasti korreloituneita, erityisesti minimi TWI_MIN, keskiarvo TWI_MEAN ja maksimi TWI_MAX. Alustavassa tarkastelussa malliin valikoitui milloin minimi, milloin keskiarvo tai maksimi. Mallien yhtenäisyyden kannalta malliin valittiin lopulta vain keskiarvo TWI_MEAN ja vaihtelua kuvannut keskihajonta TWI_STD potentiaalisiksi selittäjiksi.

Vaihtoehdossa 2) avoimien tietolähteiden tietoja täydennettiin VMI11-aineiston kasvupaikkatunnuksilla. Kasvupaikkatunnukset sisälsivät kasvupaikkaluokan (esim. kuivahko kangas), lisämääreen (esim. kivinen, soistunut) sekä päätyypin (kangas, korpi, räme). Malleissa kasvu-

paikoille käytettiin Etelä-Suomen metsätyyppilyhenteitä (esim. VT). Sen sijaan VMI11-aineiston maalajin (esim. moreeni) määritystä ei hyödynnetty mallinnuksessa, koska yleisesti ottaen maalajia ei määritetä metsäsuunnittelussa edes maastokäyntien yhteydessä. Vaihtoehtojen 1) ja 2) välinen ero mallien luotettavuudessa kuvastaa maastotyön merkitystä kasvupaikan arvioinnissa. VMI11-aineisto sisälsi myös topografiset luokat (tasamaa, laki tai rinteen yläreuna, rinne, alarinne tai viettävä notko, notko ja muu), mutta näitä ei lopullisessa mallin laadinnassa oletettu tunnetuiksi. Kun alustavassa tarkastelussa topografiset luokat olivat mukana, niin silloin askeltava regressio päätyi kosteusindeksin valintaan topografisten luokkien sijaan.

Vaihtoehdon 3) koko aineistossa tunnettiin taimikonhoitotoimenpiteet eli varhaisperkaus tai taimikon harvennus ja viimeisestä hoitotoimenpiteestä kulunut aika. Arviot toimenpiteen ajankohdasta tehtiin VMI11:n maastotyössä yhden vuoden tarkkuudella välillä 0–5 vuotta ja lisäksi arvio luokkaan 6 tarkoitti 6–10 vuotta sitten tehtyä toimenpidettä. Samoin tunnetuksi oletettiin aika viimeisestä ojituksesta (uudisojitus, ojien perkaus, täydennysojitus). Arvio tehtiin vuoden tarkkuudella 50 vuoteen saakka. Lisäksi tunnettiin vaihtoehtoiset maanmuokkaustavat, eli pinta-muokkaukset äestys ja laikutus sekä syvämuokkaukset eli mätätysmenetelmät ja auraus. Mätätys ja ojitusmätätys yhdistettiin samaan luokkaan. Myös tieto kulutuksesta tunnettiin, mutta se ei osoittautunut tilastollisesti merkitseväksi.

Koska taimikon runkolukuun ja keskipituuteen liittyi selvä iän mukainen dynamiikka, oli taimikon ikä aina malleissa mukana, eli perustamisajankohta oletettiin tunnetuksi. Myös taimikon sijainti (lämpösumma, etäisyys mereen ja korkeus merenpinnan yläpuolella) tunnettiin ja ne olivat malleissa aina mukana. Metsänkäyttöilmoituksen mukaisia tunnuksia olivat uudistamistapa (istutus/kylvö/luontainen), pääasiallinen puulaji ja maanpinnan käsittely. Nämä olivat eri malleissa yhteisiä tunnuksia kuitenkin niin, että vaihtoehdossa 1 ja 2 muokkaus kuvattiin karkeasti luokkiin muokattu ja muokkaamaton.

VMI11-poikkileikkausaineistosta pyrittiin selvittämään taimikoihin syntyvää keskimääräistä kokonaisrunkolukua, lehtipuuosuutta sekä taimikoiden keskipituutta. Nämä tiedot laskettiin kuviotiedoista, jotka ryhmänjohtaja arvioi taimikon eri puulajien keskipituudelle, kokonaisrunkoluvulle ja kasvatettavien puiden runkoluvuksi (VMI11 maastotyöohje 2009). Vaihtoehdoissa 1) ja 2) potentiaalista kokonaisrunkolukua sekä lehtipuuosuutta mallitettiin rajaamalla VMI11-aineisto maastoinventoinnin mukaisiin hoitamattomiin taimikoihin. Vaihtoehdossa 3) pyrittiin kuvaamaan taimikonhoitotoimenpiteiden vaikutukset koko aineistoa hyödyntämällä. Keskipituuden mallit laadittiin vain vaihtoehdon 3) mukaan, jolloin mahdollisen taimikonhoidon vaikutukset saatiin kuvattua.

Taimikon tiheyden malli tehtiin logaritmiselle kokonaisrunkoluvulle. Logaritmuunnoksen etuja olivat mallin linearisoituminen, looginen vastemuuttujan arvo (ei voi saada negatiivista arvoa) ja varianssin vakioituminen. Näissä malleissa iänmukaista kehitystä kuvattiin muuttujalla ikä ja muunnoksella $1/(ikä + 1)$, jolloin iän ja tiheyden epälineaarinen luonne saatiin kuvattua. Kokonaisrunkoluvun hyvin nopea nousu varhaisperkauksen jälkeen (Kuva 2) saatiin kuvattua muuttujalla $perkaus/(Th_aika + 1)$, jossa Th_aika on taimikonhoidosta kulunut aika vuosina. Taimikon harvennuksen jälkeinen hitaampi dynamiikka (Kuva 3) saatiin kuvattua muunnoksella $harvennus/(Th_aika + 5)$. Tiheyden muutos ojitusajan suhteen (Kuva 4) oli hyvin samantapainen kuin perkauksen jälkeinen tiheyskehitys. Ojituksen vaikutus taimikon kokonaistiheyteen kuvattiin jatkuvana muuttujana muodossa $ojitus/(aika\ ojituksesta + 1)$. Näissä muuttujissa perkaus, harvennus ja ojitus ovat osoitinmuuttujia. Osoitinmuuttujan arvo on 0, kun toimenpidettä ei ole tehty ja arvo on 1, kun toimenpide on tehty. Aika toimenpiteestä oli jatkuva muuttuja, joka sai arvon 0, kun toimenpide oli tehty inventointivuonna.

Pituusmalli tehtiin logaritmiselle keskipituudelle ”täydellisen tiedon” mukaan koko aineistosta. Logaritmuunnoksen etuja olivat mallin linearisoituminen, vastemuuttujan loogisuus ja

varianssin vakioituminen. Mallit tehtiin erikseen havu- ja lehtipuustolle, jotta näiden pituussuhteita voidaan tarkastella esim. hoidon tarpeen arvioimiseksi. Pituusmallissa ikä kuvattiin muodoissa ” $1/(ikä + 7)$ ”. Sen lisäksi tarvittiin puulajien välisiä eroja kuvaavia muunnoksia iästä. Kuusivaltaisille taimikoille käytettiin muuttujaa ”kuusi/ikä” ja koivuvaltaisille taimikoille muuttujaa ”koivu $\times \ln(ikä)$ ”, joissa kuusi ja koivu olivat pääpuulajia kuvaavia osoitinmuuttujia. Mallilla saatiin eri pääpuulajien (mänty, kuusi, koivu, muut lehtipuut) mukaiset pituuskehitykset syntyvöittain eri kasvupaikoille. Lehtipuista vain koivut (raudus- ja hieskoivu) erosivat merkittävästi muista lehtipuista. Sen sijaan raudus- ja hieskoivun välillä ei ollut merkittävää eroa. Taimikon viljelyn (istutus tai kylvä) lisäksi tarvittiin ”koivun istutus” -muuttujaa kuvaamaan istutetun koivun nopeaa pituuskehitystä. Käytännössä koivun istutus tehtiin kivennäismailla aina rauduskoivulla ja turvemilla hieskoivulla. Havu- ja lehtipuuston keskipituusmalleilla voitiin tarkastella esim. viljellyn havupuutaimikon pituuskehitystä suhteessa saman kasvupaikan luontaisen lehtipuuston kehitykseen joko hoidettuna tai hoitamattomana.

Yleisessä muodossa taimikon kokonaisrunkolukua ja keskipituutta kuvaava yhtälö oli:

$$\ln(Y_{i,j}) = X'_{i,j}\beta + u_j + \varepsilon_{ij}, \quad (1)$$

jossa $Y_{i,j}$ on taimikon kokonaisrunkoluku tai taimikon keskipituus koealalla i ja lohkollla j , $X_{i,j}$ on vektori selittävästä muuttujista koealalla i ja lohkollla j ja β näille estimoitu vaikutus, u_j on satunnainen lohko ja ε_{ij} jäännösvirhe. Satunnaistekijät oletettiin normaalijakautuneeksi vakiovarianssilla ja riippumattomaksi toisistaan. Logaritmisessä mallin takaisinmuunnoksessa puolet jäännösvarianssista, eli $(v_u + v_\varepsilon)/2$, tulee lisätä mallin vakioon. Virhetermi RMSE ($RMSE = \sqrt{(v_u + v_\varepsilon)}$) kuvaa suhteellista virhettä alkuperäisessä mittakaavassa. Siten esim. keskipituuden keskivirhe metreinä kasvaa keskipituuden ennusteen kasvaessa.

Lehtipuuosuutta kuvattiin epälineaarilla mallilla, jossa vastemuuttuja voi saada arvon nollan ja yhden välillä. Sopiva regressiomalli voitiin tehdä logistisella yhtälöllä, jossa vastemuuttuja oli lehtipuun osuus kokonaisrunkoluvusta. Yleisessä muodossa lehtipuuosuuden malli oli:

$$\text{lehtipuuosuus} = 1/(1 + \exp(-X'\beta)) + \varepsilon, \quad (2)$$

jossa X on vektori selittävästä muuttujista ja β näille estimoitu vaikutus ja ε jäännösvirhe. Yhtälön 2 lehtipuuosuuden mallissa hyödynnettiin samoja potentiaalisia selittäjiä X kuin Yhtälössä 1. Iänmukaista lehtipuuosuuden kehitystä kuvattiin muuttujilla ikä ja ” $1/(ikä + 1)$ ”, jotta epälineaarinen riippuvuus iän suhteen saatiin kuvattua. Lehtipuuosuuden jäännösvarianssi noudattaa lehtipuuosuuden ennustetta (P) siten, että varianssi $v = nP(1 - P)$, jossa n on skaalausparametri. Varianssi on siten suurimmillaan ennusteen ollessa 0,5. Skaalausparametrin arvo laskettiin siten, että lopullisen mallin painona käytetty varianssin käänteisluku $1/v$ oli keskimäärin 1. Siten havainnot, joilla oli pieni varianssi, saivat suuremman painon. Havaintojen painotuksen takia myös lehtipuuosuuden RMSE on painotettu.

Puutteellisen tiedon vallitessa vaihtoehdoissa 1) ja 2) mallit kuvasivat kasvupaikan keskimääräistä runkoluvun ja lehtipuuosuuden kehitystä ilman taimikonhoitoa, kun taas ”täydellisen tiedon” vallitessa vaihtoehdossa 3) taimikonhoidon ja turvemaiden ojituksen historia otettiin mallissa huomioon.

Tässä tutkimuksessa lineaariset mallit laadittiin erikseen logaritmiselle runkoluvulle ja pituudelle aluksi OLS-regressiomalleina (pienimmän neliösumman eli Ordinary Least Squares -sovitus). Mallit sovitettiin SAS-ohjelmiston Proc Reg -proseduurilla eteenpäin askeltavana regressiona. Lopulliseksi malliksi valikoitiin malli, jossa selittävien muuttujien riskitaso oli pääsääntöisesti alle 5 % ($p < 0,05$). Kuitenkin, jos jokin muuttujan vaikutus oli looginen ja huomattava, mutta riskitaso

$0,05 < p < 0,1$, se voitiin ottaa malliin mukaan. Suuressa aineistossa virheellisen päätelmän riski on pieni. Lopullisissa malleissa käytettiin GLS-menetelmää (generalized least squares) varianssikomponenttimallin (sekamallin) sovitukseen (McCulloch ja Searle 2001). Sekamalleissa spatiaalinen autokorrelaatio otettiin huomioon. Vaikka taimikoita osui satunnaisesti eri lohkoille, silti lohkojen sisäinen ja lohkojen välinen vaihtelu erosivat toisistaan. Sekamallit sovitettiin SAS ohjelman Proc Mixed -proseduurilla.

Lehtipuuosuuden logistinen regressio laadittiin SAS-ohjelmiston Proc Nlin -proseduurilla. Mallin sopivia selittäviä muuttujia haettiin aluksi logaritmisella lehtipuuosuuden eteenpäin askeltavalla lineaarisella regressiolla. Näin saadun alustavan mallin tärkeimmät muuttujat ($p < 0,05$) sijoitettiin logistiseen regressioyhtälöön ja saatuja estimaatteja hyödynnettiin parametrien alkuarvoina. Lopullinen sovitus tehtiin siten, että havaintoja painotettiin ennustetun varianssin käänteisluvulla.

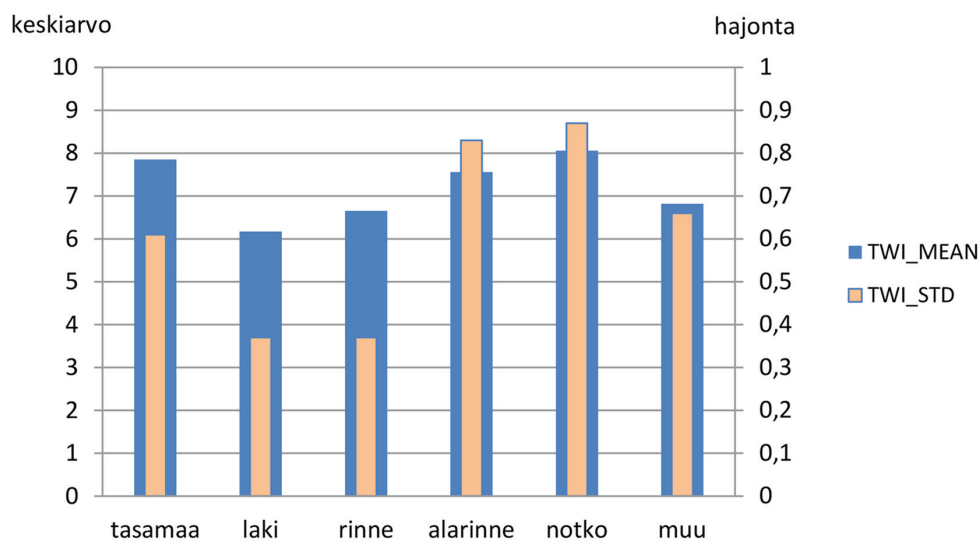
Mallien hyvyyttä tarkasteltiin keskineliövirheen neliöjuuren RMSE avulla ja sen lisäksi lineaarisia malleja OLS-mallin selitysasteen R^2 avulla. Kaikissa malleissa tarkasteltiin estimoitujen parametrien välisiä korrelaatioita suurten korrelaatioiden välttämiseksi. Yleisesti ottaen korrelaatiot olivat pieniä. Kun epälineaarisen riippuvuuden saavuttamiseksi tarvittiin taimikon ikää erilaisina muunnoksina, olivat niille estimoidut parametrit keskenään korreloituneita ($r = 0,5-0,7$). Myös maantieteellistä sijaintia kuvanneiden muuttujien estimoiduissa parametreissa oli suhteellisen korkeita korrelaatiokertoimia, kuten lämpösunnan ja korkeus merenpinnasta muuttujien välillä ($r = 0,7$) tai korkeus merenpinnasta ja etäisyys mereen muuttujien välillä ($r = -0,5$).

3 Tulokset

3.1 VMI11:n taimikoiden tunnuksiset

3.1.1 Topografian ja kasvupaikkatyypin riippuvuus

Kun VMI11-aineiston taimikoiden topografista luokkaa verrattiin koelohjoille laskettuun topografiseen kosteusindeksiin keskiarvoon ja hajontaan, niin näiden välillä oli huomattavissa selkeä yhdenmukaisuus (Kuva 1). Kosteusindeksiin hajonta (TWI_STD) näytti seuraavan keskiarvoa



Kuva 1. Taimikoiden maastotyön mukainen topografinen luokka ja topografiaan perustuva keskimääräinen kosteusindeksi (TWI_MEAN eli Mean Topographic Wetness Index) vasemmalla ja sen hajonta (TWI_STD) oikealla y-akselilla.

Taulukko 3. Keskimääräinen kosteusindeksi (TWI_MEAN) kasvupaikkaluokittain, joita kuvataan Etelä-Suomen metsätyyppien ja näitä vastaavien turvekankaiden lyhennyksillä.

Kasvup	kivennäismaa		turvemaa		koko aineisto	
	TWI_MEAN	n	TWI_MEAN	n	TWI_MEAN	n
OMaT/Rhtkg	7,814	90	9,520	10	7,985	100
OMT/Rhtkg	7,334	835	9,208	188	7,679	1023
MT/Mtkg	7,221	2605	8,835	300	7,387	2905
VT/Ptkg	7,220	1411	8,984	233	7,470	1644
CT/Vtkg	7,373	253	9,207	88	7,846	341
CIT/Jtkg	9,866	7	10,040	4	9,929	11
kalliomaa	6,043	10			6,043	10

(TWI_MEAN) paremmin maastossa tehtyä topografista luokitusta, koska TWI_STD oli suurin alarinteessä ja notkossa, kun taas TWI_MEAN oli keskimäärin lähes yhtä suuri tasamaalla kuin alarinteessä ja notkossa (Kuva 1). Toisaalta TWI_STD sai keskimäärin saman arvon rinteessä ja mäen laella, kun taas TWI_MEAN oli rinteessä suurempi kuin mäen laella (Kuva 1).

Kosteusindeksin ja kasvupaikkaluokan välillä oli nähtävissä riippuvuus parhaiden kasvupaikkojen välillä lehdoista tuoreisiin kankaisiin. Kosteusindeksin arvo kasvoi kasvupaikan viljavuuden kasvaessa (Taulukko 3). Kuivahko kangas sai saman tai jopa hieman suuremman kosteusindeksin kuin tuore kangas. Karukkokankailta ja vastaavilta turvemailta oli vain 11 havaintoa, mutta ne saivat systemaattisesti suurimmat kosteusindeksin keskiarvot (Taulukko 3). Turvemailta oli systemaattisesti suurempi kosteusindeksin arvo kuin kivennäismailla (Taulukko 3).

3.1.2 Maalajien luokituksen yhdenmukaisuus

VMI11-aineiston maastossa arvioituja maalajeja verrattiin GTK:n maaperäkartan tietoihin. Mitä suurempi osa havainnoista osuu taulukon lävistäjälle, sitä paremmin luokitukset vastaavat toisiaan. Kuitenkin maalajit poikkesivat GTK- ja VMI11-luokitusten välillä huomattavan paljon (Taulukko 4).

Turve- ja moreenimaita lukuun ottamatta lävistäjälle osui alle puolet kunkin luokan havainnoista (Taulukko 4). Erityisen paljon poikkesivat karkeat lajittuneet maat, joita VMI11-luokitukseen osui vain 26 kpl, kun taas GTK-luokituksessa niitä oli 131 ja näistä samaan luokkaan osui vain 4 havaintoa. Kalliomaa oli GTK-luokituksessa erittäin yleinen luokka (pintamaan syvyys 0,4–

Taulukko 4. GTK:n maaperäkartan ja VMI11-maastotyöhön perustuva pintamaan luokitus. Luokka muu sisältää muut kuin jäljempänä esitellyt kivennäismaat, hieno = hienojakoinen lajittunut (savi, hiesu, hieno hieta), karkea = karkeat lajittuneet (karkea hiekka, sora), kallio = kivikko, kalliomaa ja kalliopaljastuma.

VMI maalaji	turve	muu	hieno	GTK maalaji			yhteensä
				karkea	kallio	moreeni	
turve	290	56	22	6	16	206	596
muu	26	106	47	30	52	329	590
hieno	34	47	134	18	18	220	471
karkea	1	8	0	4	4	9	26
kallio	3	5	2	0	87	54	151
moreeni	157	200	110	73	762	2898	4200
yhteensä	511	422	315	131	939	3716	6034

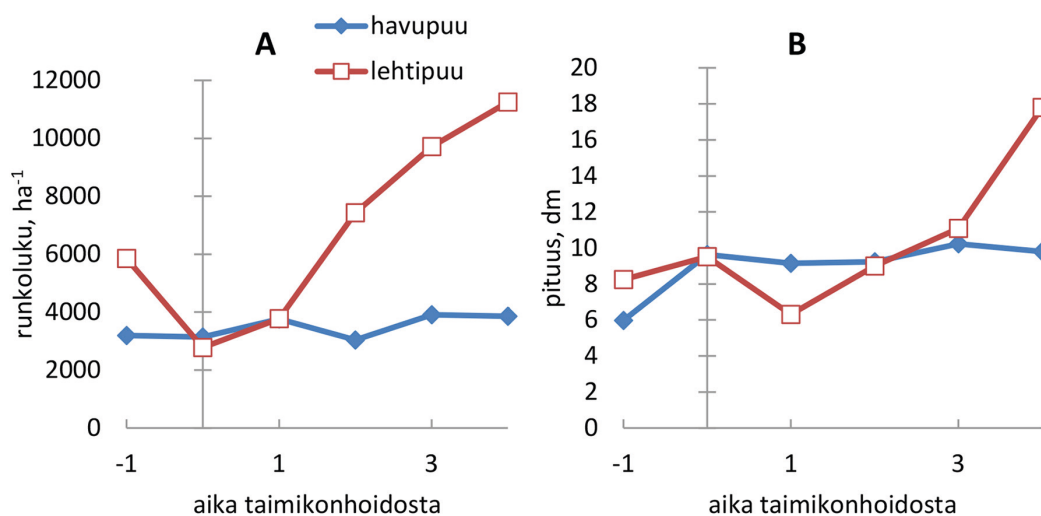
0,9 m). Tässä vertailussa rinnastettiin GTK-luokituksen kalliomaa ja kalliopaljastuma silloin, kun ne yksistään kuvasivat koko koealaa ja vertailuna oli VMI11-luokituksen kivikko ja kalliomaa, jossa sallittiin alle 10 cm pintamaata. Tälläkin rajauksella havaintoja oli GTK-luokituksessa 939, kun taas VMI11-aineistossa niitä oli 151. Tosin näistä VMI11-maastotyön kivikko-/kalliomaa-luokista valtaosa (87) osui GTK:n maaperäkartan vastaavaan luokkaan. Paras yhteensopivuus oli luokassa hienojakoinen lajittunut maalaji, jossa 315:stä GTK-luokituksen mukaisesta hienojakoisesta kohteesta 134 osui VMI11-luokituksen vastaavaan luokkaan (Taulukko 4). GTK-luokituksen turvemaista oli lähes puolet VMI11-luokituksen moreenimaita (206 kpl). Vaikka luokituksissa oli huomattavia eroja, voi GTK-luokitus olla hyödyllinen taimikoiden tunnuksia ja etenkin taimikon tiheyttä ennustettaessa.

3.1.3 Taimikonhoidon ajankohdan vaikutus runkolukuun ja keskipituuteen

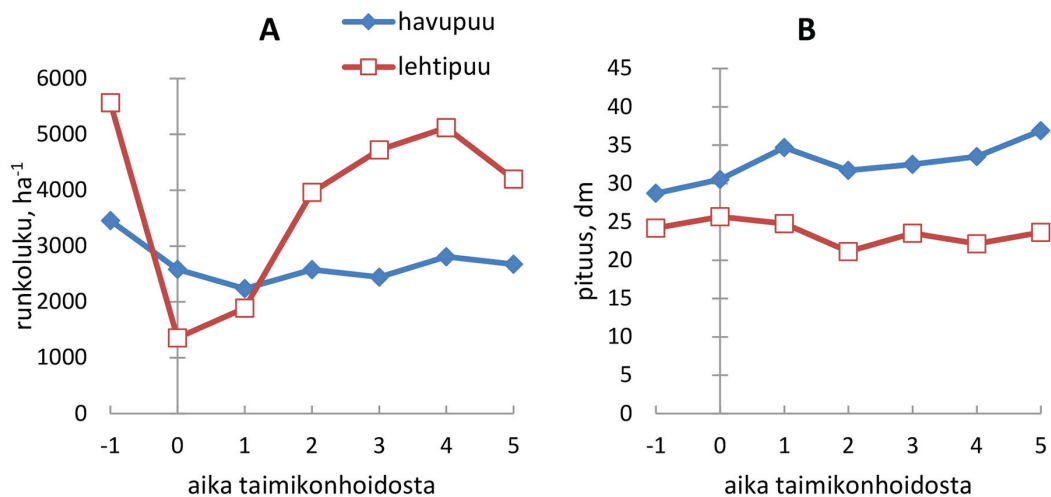
Pienissä taimikoissa hoitamattomien taimikoiden lehtipuuston tiheys oli keskimäärin n. 6000 ha⁻¹ (Kuva 2A, aika taimikonhoidosta -1) ja heti perkauksen jälkeen (aika taimikonhoidosta 0) se oli 2800 ha⁻¹ (Kuva 2A). Tämän jälkeen lehtipuuston runkoluku kasvoi nopeasti. Jo kaksi vuotta perkauksesta runkoluku oli suurempi (7400 ha⁻¹) kuin keskimääräinen runkoluku hoitamattomissa pienissä taimikoissa (Kuva 2A).

Lehtipuusto (keskipituus 82 cm) oli havupuustoa (keskipituus 60 cm) pidempää hoitamattomissa pienissä taimikoissa (Kuva 2B). Taimikon perkauksen jälkeen havupuusto oli pidempää, kunnes kolme vuotta perkauksesta lehtipuuston keskipituus meni havupuuston keskipituuden edelle. Lopulta neljä vuotta perkauksen jälkeen havupuun keskipituus (98 cm) jäi huomattavasti jälkeen lehtipuuston pituudesta (178 cm). Koska tulos on laskettu poikkileikkausaineistosta, se ei kuvaa yksittäisten taimikoiden tiheyden tai pituuden kehitystä vaan VMI11-aineistossa taimikoiden keskimääräistä tilaa eri kehitysvaiheissa suhteessa taimikonhoidon ajoitukseen.

Varttuneissa taimikoissa muutokset eivät olleet yhtä nopeita kuin pienissä taimikoissa. Taimikon harvennuksen jälkeen lehtipuuston runkoluku ei saavuttanut hoitamattomien taimikoiden lehtipuuston runkolukua n. 5600 ha⁻¹, vaan korkeimmillaan neljä vuotta toimenpiteestä runkoluku



Kuva 2. Pienen taimikon varhaisperkauksen ja sen ajankohdan vaikutus havu- ja lehtipuuston keskimääräiseen runkolukuun (A) ja pituuteen (B) VMI11-aineistossa. Kun aika taimikonhoidosta on negatiivinen, ei taimikkoa ole perattu.



Kuva 3. Varttuneen taimikon harvennuksen ja sen ajankohdan vaikutus havu- ja lehtipuuston runkolukuun (A) ja keskipituuteen (B) VMI11-aineistossa. Kun aika taimikonhoidosta on negatiivinen, ei taimikkoa ole harvennettu.

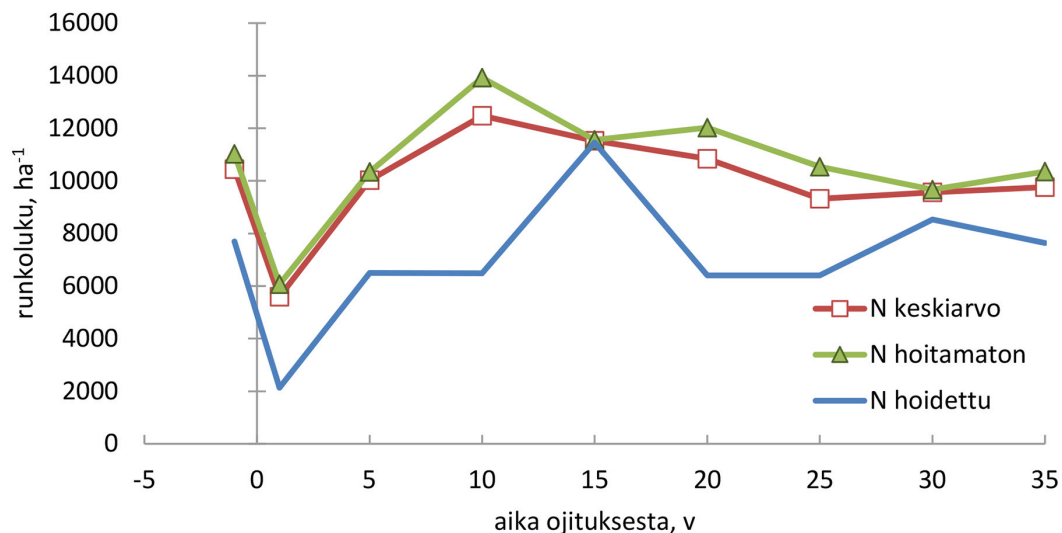
oli noin 5000 ha⁻¹ (Kuva 3A). Hoitamattomissa varttuneissa taimikoissa havupuuston tiheys oli keskimäärin 3500 runkoa ha⁻¹. Taimikon harvennukseen jälkeen havupuuston runkoluku vaihteli vain vähän, välillä 2200–2800 ha⁻¹ (Kuva 3A).

Havupuuvaltaisissa taimikoissa havupuuston keskipituus (2,9 m) oli hoitamattomissa varttuneissa taimikoissa hieman lehtipuuston keskipituutta (2,4 m) suurempi. Taimikon harvennuksen yhteydessä pituussuhteet muuttuivat tätä enemmän havupuustoa suosivaksi, koska havupuusto oli tuolloin noin 1 m:n lehtipuustoa pidempää (Kuva 3B). VMI11-poikkileikkausaineistosta laadittu Kuva 3B ei edusta varsinaista pituuden iänmukaista kehitystä mm. siksi, että aika taimikonhoidosta ei jaa aineistoa suoraviivaisesti nouseviin ikäluokkiin.

Huomautettakoon lopuksi, että VM11-aineiston suhteellisen vähälukuisissa lehtipuuvaltaisissa taimikoissa tilanne oli täysin erilainen. Etenkin pituussuhteiden mukaan voisi olettaa, että lehtipuutaimikkoon oli syntynyt kuusialikasvos. Keskipituudeltaan noin 4–6 m:n lehtipuuvaltaisissa hoidetuissa taimikoissa havupuuston keskipituus oli vain 2 m. Havupuuston tiheys oli keskimäärin vain 500 ha⁻¹, kun lehtipuuston tiheys vaihteli samalla välillä 2300–10000 ha⁻¹.

3.1.4 Ojituksen ajankohdan vaikutus taimikon tiheyteen

Turvemailla aika ojituksesta vaikutti selvästi puuston tiheyteen. VMI11-aineisto luokiteltiin ”aika ojituksesta” -muuttujan mukaan ja sen lisäksi huomioitiin, oliko taimikkoa hoidettu vai ei. Aluksi runkoluku pieneni, mutta ojituksen jälkeen runkoluku kasvoi hyvin nopeasti saavuttaen maksimitiheyden noin 10 vuotta ojituksen jälkeen. Sen jälkeen runkoluku alkoi hitaasti laskea hoitamattomien taimikoiden maksimitiheydestä 14000 ha⁻¹ ojituksesta kuluneen ajan funktiona noin tiheyteen 10000 ha⁻¹ 20 vuoden kuluessa (Kuva 4). Hoidetuissa taimikoissa runkoluku puolestaan nousi trendinomaisesti noin tiheydestä 2000 ha⁻¹ tiheyteen vajaa 8000 ha⁻¹ ojituksesta kuluneen ajan funktiona (Kuva 4). 15 vuoden kohdalle osui yksittäinen poikkeava havainto, jossa runkoluku sekä hoidetuissa että hoitamattomissa ojitetuissa taimikoissa oli käytännöllisesti katsoen sama, eli 11560 ja 11460 ha⁻¹ (Kuva 4).



Kuva 4. Kokonaisrunkoluku turvemaiden ojitusajankohdan mukaan keskimäärin ja erikseen hoidetuissa ja hoitamattomissa taimikoissa VM11-aineistossa. Negatiivinen ojitusaika tarkoittaa ojitamatonta.

3.2 Taimikon tunnuksien puutteellisen tiedon vallitessa

3.2.1 Avointen tietolähteiden selittävät muuttujat

Kokonaisrunkolukua selittävät muuttujat olivat pääosin erittäin merkitseviä. Uudistamistavoista istutus merkitsi pienempää runkolukua kuin kylvä tai luontainen uudistaminen, jotka eivät eronneet merkittävästi toisistaan (Taulukko 5). Turvemaita kuvaavista tunnuksista mukaan tuli vain ojitus, joka lisäsi runkolukua. Taimikon muokkaamattomuus merkitsi pienempää runkolukua. Samoin runkoluku oli odotusarvoa pienempi, jos maalaji oli GTK-maaperäkartan mukaan savimaata tai kalliomaata. Kosteusindeksin TWI_MEAN kasvaessa taimikon runkoluku suureni. Avointen tietolähteiden kasvupaikan kuvauksella logaritmisessä kokonaisrunkoluvun selityksessä OLS mallissa oli $R^2 = 16,6\%$. Sekamallin varianssikomponentit olivat $v_u = 0,2344$ ja $v_e = 0,3969$. Näistä saatiin

Taulukko 5. Hoitamattomien taimikoiden logaritmisessä kokonaisrunkoluvun sekamallin avoimen tietolähteen kasvupaikan kuvauksella ennustettuna.

Selittäjä	Estimaatti	Hajonta	t-arvo	P > t
vakio	4,0364	0,9395	4,3	<0,0001
ln(lämpösumma), °Cvrk	0,7913	0,1285	6,16	<0,0001
meren pinnan yläpuolella, m	-0,00167	0,00033	-5,02	<0,0001
merietäisyys, km	0,000994	0,00021	4,8	<0,0001
ikä, v	-0,03694	0,00232	-15,91	<0,0001
1/(ikä + 1)	-2,7818	0,1762	-15,79	<0,0001
istutus	-0,2078	0,02419	-8,59	<0,0001
muokkaamaton	-0,2111	0,02892	-7,3	<0,0001
ylispuusto	-0,1526	0,02894	-5,27	<0,0001
ojitus	0,09855	0,03517	2,8	0,0051
GTK savi	-0,2545	0,05777	-4,41	<0,0001
GTK kalliomaata	-0,07282	0,02785	-2,61	0,009
TWI_MEAN	0,04201	0,00741	5,67	<0,0001

TWI_MEAN = topografisen kosteusindeksin keskiarvo

Taulukko 6. Lehtipuun suhteellisen osuuden mallin lineaarinen osa ($X'\beta$) avoimen tietolähteen kasvupaikan kuvauksella ennustettuna.

Selittäjä	Estimaatti	Hajonta	95 %:n luottamusväli	
vakio	-11,0211	1,7226	-14,398	-7,6441
ln(lämpösumma), °Cvrk	2,0466	0,2324	1,591	2,5022
meren pinnan yläpuolella, m	-0,00171	0,000585	-0,0029	-0,0006
merietäisyys, km	0,00134	0,000363	0,00063	0,00206
ikä, v	-0,0753	0,00507	-0,0853	-0,0654
1/(ikä + 1)	-3,8546	0,3651	-4,5703	-3,1388
istutus	0,2578	0,0552	0,1495	0,3661
kylvö	-0,165	0,0631	-0,2888	-0,0412
mänty pääpuulajina	-0,6345	0,0542	-0,7407	-0,5283
havupuu pääpuulajina	-2,1033	0,099	-2,2973	-1,9093
GTK karkearakeinen	-0,5006	0,0747	-0,647	-0,3542
TWI_MEAN	0,059	0,0137	0,0322	0,0857

TWI_MEAN = topografisen kosteusindeksin keskiarvo

keskineliövirheen neliöjuuri RMSE, joka oli $\sqrt{(0,2344 + 0,3969)} = 0,7220$. Takaisinmuunnoksen yhteydessä harhan korjaustermi $(0,2344 + 0,3969)/2$, eli 0,2606 tulee lisätä Taulukon 5 vakioon.

Lehtipuuston osuutta taimikon runkoluvusta kuvaavan logistisen mallin (Yhtälö 2) lineaariseen osaan ($X'\beta$) tuli huomattavan paljon samoja selittäjiä kuin kokonaisrunkoluun. Keinollinen uudistaminen istuttaen, maaperän muokkaamattomuus ja turvemaiden ojitus merkitsivät keskimääräistä suurempaa lehtipuuosuutta, kun taas kylvö pienempää lehtipuuosuutta (Taulukko 6). Kun taimikon pääpuulajina oli havupuu, niin lehtipuuston osuus pieni selvästi ja vielä enemmän taimikoissa, joissa mänty oli pääpuulajina (Taulukko 6). GTK-maaperäkartan tiedoista merkitsevä selittäjä oli karkearakeinen maalaji, joka merkitsi pienempää lehtipuuosuutta. Kosteusindeksin TWI_MEAN kasvaessa lehtipuuston osuus suureni (Taulukko 6). Lehtipuuosuusmallin ennusteen keskiarvo oli 0,525 ja painotettu RMSE oli 0,268.

3.2.2 VMIII-aineiston kasvupaikan kuvaus malleihin

Kaikki edellisen vaihtoehdon kokonaisrunkoluvun mallissa olleet selittävät muuttujat sisältyivät myös tähän vaihtoehtoon, jossa tietoja täydennettiin VMIII-aineiston kasvupaikkaa kuvaavilla tunnuksilla. Ojitusta lukuun ottamatta myös parametrien estimaatit olivat lähes samat kuin vaihtoehdossa 1. Mallin perustasoa edustanut tuore kangas osoittautui erityisen alttiiksi taimettumiselle, koska sekä viljavimmilla kasvupaikoilla (OMaT, OMT) että karummilla (VT ja CT) kasvupaikoilla kokonaisrunkoluku oli tätä pienempi (Taulukko 7). Kasvupaikan merkitys oli myös erittäin suuri ja sen kuvaamiseksi tarkasteltiin kasvupaikan ja tyypillisen syntytavan vaikutusta mallin ennusteseen 10-vuotiaassa taimikossa, kun sijainti ja kosteusindeksi (TWI_MEAN 7,3) syötettiin malliin aineiston keskiarvoina. Luontaisen tuoreen (MT) kankaan hehtaarikohtainen runkoluku oli 13930 ja istutettuna se oli 10910. Vastaavat istutustaimikoiden runkoluvut lehdossa ja lehtomaisilla kasvupaikoilla olivat OMaT 6400 ha⁻¹ ja OMT 9090 ha⁻¹. Kuivahkojen ja kuivien kankaiden luontaisesti syntyneiden taimikoiden hehtaarikohtaiset runkoluvut olivat vastaavasti VT 11480 ja CT 10030.

Myös kosteusindeksin (topografisen aseman) vaikutus runkolukuun oli varsin huomattava. Kun malliin sijoitettiin indeksin arvo 4, niin runkoluku oli 14 % pienempi kuin keskimääräisellä kosteusindeksillä ja indeksin arvolla 15 runkoluku oli vastaavasti 39 % suurempi kuin keskimääräisellä kosteusindeksillä. Mallin perustasolla 10-vuotiaan tuoreen kankaan taimikossa vastaavat

Taulukko 7. Hoitamattomien taimikoiden logaritmissen kokonaisrunkoluvun sekamalli VMI11:n kasvupaikkaa kuvaavilla tunnuksilla täydennettynä.

Selittäjä	Estimaatti	Hajonta	t-arvo	P > t
vakio	4,1227	0,9425	4,37	<0,0001
ln(lämpösumma), °Cvrk	0,7978	0,1289	6,19	<0,0001
meren pinnan yläpuolella, m	-0,00177	0,00033	-5,39	<0,0001
merietäisyys, km	0,00101	0,00021	4,91	<0,0001
ikä, v	-0,03554	0,00232	-15,29	<0,0001
1/(ikä + 1)	-2,8053	0,1749	-16,04	<0,0001
istutus	-0,2445	0,02614	-9,35	<0,0001
muokkaamaton	-0,2131	0,0288	-7,4	<0,0001
ylispuusto	-0,1442	0,02862	-5,04	<0,0001
ojitus	-0,1693	0,08361	-2,02	0,0431
OMaT	-0,5326	0,08003	-6,65	<0,0001
OMT	-0,1817	0,03101	-5,86	<0,0001
VT	-0,193	0,02748	-7,02	<0,0001
CT-	-0,3283	0,04752	-6,91	<0,0001
korpi tai räme	0,2973	0,08111	3,67	0,0003
GTK savi	-0,2206	0,05761	-3,83	0,0001
GTK kalliomaa	-0,07902	0,02754	-2,87	0,0042
TWI_MEAN	0,0408	0,00744	5,49	<0,0001

TWI_MEAN = topografisen kosteusindeksin keskiarvo

erot olivat runkolukuina n. 1750 ha⁻¹ ja 5140 ha⁻¹. TWI_MEAN-tunnuksen vaihteluväli VMI11-aineiston hoitamattomissa taimikoissa oli 3,9–17,9.

Turvemaa kuvautui eri tavalla kuin edellisessä vaihtoehdossa 1), jossa ojitus lisäsi runkolukua. Nyt turvemaille (eli päätyyppi oli korpi tai räme) tuli noin 30 % suurempi kokonaisrunkoluku kuin kivennäismaille, mutta ojitus pienensi tätä eroa noin 16 % (Taulukko 7). Sen sijaan korpi ja räme eivät erottuneet merkitsevästi toisistaan. Tämän logaritmissen runkoluvun selitysaste OLS mallissa oli R²=19,0 %. Sekamallin varianssikomponentit olivat v_u=0,1212 ja v_c=0,3855 ja näistä laskettu RMSE oli 0,7118. Takaisinmuunnoksen yhteydessä harhan korjaustermi (0,1212+0,3855)/2 eli 0,2533 tulee lisätä vakioon.

Lehtipuuosuuden malliin sisältyivät kaikki vaihtoehdon 1) selittäjät ja parametrien estimaatit olivat lähes samoja (vrt. Taulukko 6 ja 8). Poikkeuksena oli istutuksen vaikutus (0,13), joka pieni selvästi edelliseen malliin verrattuna (0,26) sekä karkearakeisuuden vaikutus (-0,36), joka oli edellisessä mallissa -0,50. Lehdot (OMaT), kuivahkot (VT) sekä kuivat ja sitä huonommat (CT-) kasvupaikat olivat lehtipuuosuudeltaan merkitsevästi pienempiä kuin perustason tuore kangas tai sitä vastaava turvemaan kasvupaikka (Taulukko 8). Sen sijaan lehtomainen kangas ei eronnut tuoreesta kankaasta merkitsevästi lehtipuuosuudeltaan. GTK:n maaperäkartan tiedoista uutena tunnuksena malliin tuli savimaa (Taulukko 8). Savimaille oli mallin perustaso pienempi lehtipuuosuus. Parametrien estimaateista päätellen kasvupaikkaluokkien väliset erot olivat suurempia kuin maaperätunnusten väliset erot. Kun kosteusindeksin arvoiksi sijoitettiin 4 ja 15, niin lehtipuuosuudet muuttuivat keskiarvoon verrattuna n. 5 % pienemmäksi ja 10 % suuremmaksi. VMI11-aineiston kasvupaikkatunnuksilla täydennettyn lehtipuuosuusmallin keskimääräinen ennusteen arvo oli 0,524 ja painotettu RMSE oli 0,259.

Taulukko 8. Lehtipuun suhteellisen osuuden mallin lineaarinen osa ($X'\beta$) VMI11:n kasvu-paikkaa kuvaavilla tunnuksilla täydennettynä.

Selittäjä	Estimaatti	Hajonta	95 %:n luottamusväli	
vakio	-12,1898	1,7549	-15,6302	-8,7494
ln(lämpösumma), °Cvrk	2,1777	0,2369	1,7133	2,642
meren pinnan yläpuolella, m	-0,00148	0,00059	-0,00264	-0,00033
merietäisyys, km	0,00134	0,000369	0,000612	0,00206
ikä, v	-0,0607	0,00496	-0,0704	-0,051
1/(ikä + 1)	-3,3423	0,3578	-4,0438	-2,6407
istutus	0,1293	0,0567	0,0181	0,2404
kylvö	-0,2230	0,0650	-0,3505	-0,0956
mänty pääpuulajina	-0,3276	0,0603	-0,4459	-0,2094
havupuu pääpuulajina	-2,0369	0,0930	-2,2191	-1,8546
OMaT	-0,4132	0,1547	-0,7165	-0,11
VT	-0,5610	0,0565	-0,6716	-0,4503
CT-	-1,4937	0,1160	-1,7211	-1,2662
GTK karkearakeinen	-0,3590	0,0772	-0,5104	-0,2076
GTK savi	-0,2386	0,1139	-0,4619	-0,0153
TWI_MEAN	0,0716	0,0139	0,0444	0,0988

TWI_MEAN = topografisen kosteusindeksin keskiarvo

3.3 Taimikon tunnuksien ”täydellisen tiedon” vallitessa

3.3.1 Taimikonhoidon vaikutus ennustettuun tiheyteen ja lehtipuuston osuuteen

Kun koko aineisto otettiin mallinnuksen kohteeksi, niin runkoluvun ja lehtipuuosuuden mallien muodot pysyivät koko lailla edellisten mallien muotoisina mutta täydentyivät toimenpiteiden kuvauksilla. Yksi muutos runkoluvun mallissa oli istutuksen jakaminen osoitinmuuttujiin ”istutus”, joka tarkoitti kaikkia istutusmetsiä ja lisäksi ”koivun istutus” kuvaamaan raudus- ja hieskoivun istutustaimikoita (Taulukko 9). Taimikon kokonaisrunkoluku oli pienempi istutusmetsissä ja erityisesti silloin, kun kyseessä oli suhteellisen harvana perustettava koivun istutustaimikko (Taulukko 9). GTK:n maaperätiedoista malliin tuli uutena muuttujana ”paksu turvekerros”, joka merkitsi noin 7 % pienempää runkolukua (Taulukko 9). Kosteusindeksin (topografisen aseman) vaikutus runkolukuun (0,039) oli hieman pienempi kuin aikaisemmissa vaihtoehtoisissa hoitamattomille taimikoille (0,041 ja 0,042). Taimikon perkaus ja harvennus vaikuttivat toimenpiteestä kuluneen ajan funktiona siten, että välittömän tiheyden pienentymisen jälkeen taimikon runkoluku kasvoi (Kuvat 2, 3 ja 4). Myös ojitus vaikutti aluksi tiheyttä pienentäen, mutta sen jälkeen kokonaisrunkoluku kasvoi nopeasti. Taimikon varttuessa se sulkeutuu ja runkoluku alkaa laskea riippumatta siitä, hoidetaanko taimikkoa vai ei (Kuva 5).

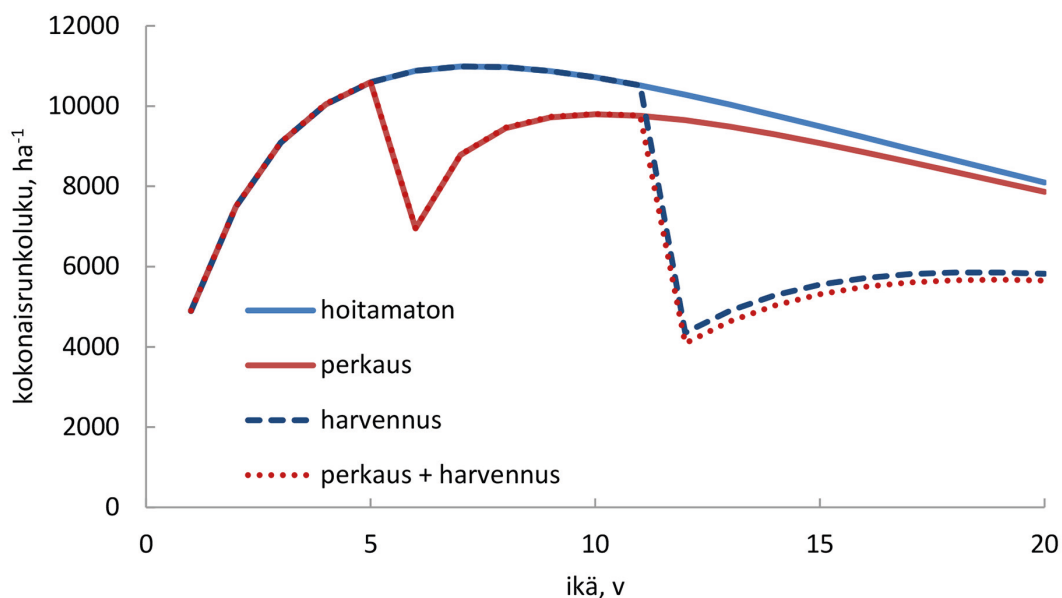
Koko aineistossa runkoluvun selitysaste OLS mallissa oli $R^2 = 22,4\%$. Sekamallin varianssi-komponentit olivat $v_u = 0,0956$ ja $v_e = 0,4028$ ja näistä laskettu $RMSE = 0,706$. Takaisinmuunnoksen yhteydessä harhan korjaustermi $(0,0956 + 0,4028)/2$ eli 0,249 tulee lisätä vakioon. Vaikka taimikon tiheyden dynamiikka saatiin varsin hyvin kuvattua erilaisten toimenpiteiden yhteydessä (esim. Kuva 2, Kuva 3 ja Kuva 5), jäi taimikon tiheyteen paljon selittämätöntä vaihtelua.

Kun lehtipuuosuuden malliin otettiin mukaan tehdyt toimenpiteet ajoituksineen, niin mallista tippui pois edellisessä vaihtoehdossa 2) ollut GTK:n maaperätiedon ”ohut turvekerros”. Toimenpiteistä perkaus ja harvennus tulivat malliin mukaan, mutta ojitus ei (Taulukko 10). Itse asiassa

Taulukko 9. Logaritmissen kokonaisrunkoluvun sekamalli ”täydellisen tiedon” vallitessa.

Selittäjä	Estimaatti	Hajonta	t-arvo	P > t
vakio	4,3851	0,8507	5,15	<0,0001
ln(lämpösumma), °Cvrk	0,7535	0,1162	6,48	<0,0001
meren pinnan yläpuolella, m	-0,00183	0,00029	-6,26	<0,0001
merietäisyys, km	0,001232	0,00018	6,98	<0,0001
ikä, v	-0,04012	0,00212	-18,96	<0,0001
1/(ikä + 1)	-2,7985	0,1705	-16,41	<0,0001
istutus	-0,1703	0,02138	-7,96	<0,0001
koivun istutus	-0,5276	0,06959	-7,58	<0,0001
OMaT	-0,4321	0,073	-5,92	<0,0001
OMT	-0,1637	0,0268	-6,11	<0,0001
VT	-0,1585	0,02373	-6,68	<0,0001
CT-	-0,3354	0,04268	-7,86	<0,0001
korpi tai räme	0,1722	0,03581	4,81	<0,0001
ylispuusto	-0,1434	0,0252	-5,69	<0,0001
GTK savi	-0,1819	0,05096	-3,57	0,0004
GTK kalliomaa	-0,07501	0,02356	-3,18	0,0015
GTK paksu turvekerros	-0,07845	0,03974	-1,97	0,0485
TWI_MEAN	0,03897	0,00651	5,99	<0,0001
perkaus/(Th_aika + 1)	-0,4482	0,09715	-4,61	<0,0001
harvennus/(Th_aika + 5)	-4,2984	0,1905	-22,56	<0,0001
ojitus/(ojitus aika + 1)	-0,3606	0,2187	-1,65	0,0992

Th_aika = aika viimeisestä taimikonhoitotoimenpiteestä; TWI_MEAN = topografisen kosteusindeksin keskiarvo



Kuva 5. Kokonaisrunkoluku tuoreen kasvupaikan istutustaimikossa aineiston keskiarvoilla (lämpösumma 1100 °Cvrk, merietäisyys 120 km, korkeus 130 m merenpinnasta) ennustettuna. Vaihtoehtoisia kehityksiä on kuvattu hoitamattomalle, peratulle ja harvennetulle taimikolle sekä taimikolle, jossa on tehty sekä perkaus että harvennus. Varhaisperkaus on tehty 6 vuotta ja harvennus 12 vuotta taimikon perustamisen jälkeen.

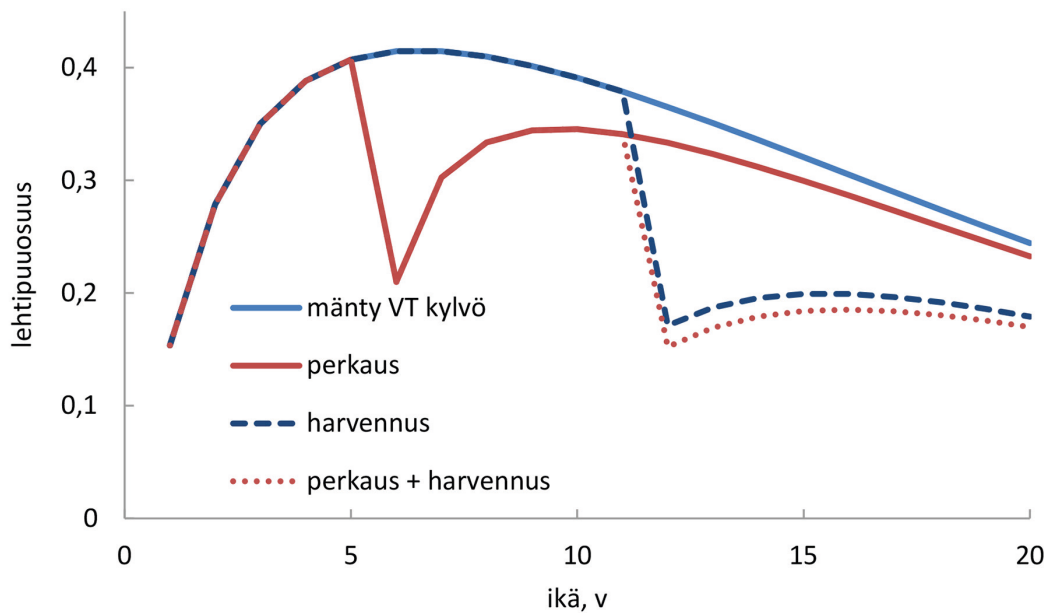
Taulukko 10. Lehtipuun suhteellisen osuuden mallin lineaarinen osa (X/β) ”täydellisen tiedon” vallitessa.

Selittäjä	Estimaatti	Hajonta	95 %:n luottamusväli	
vakio	-9,5814	1,6006	-12,7192	-6,4437
ln(lämpösumma), °Cv _{rk}	1,8835	0,2166	1,4589	2,3081
meren pinnan yläpuolella, m	-0,00187	0,00053	-0,00291	-0,00084
merietäisyys, km	0,00127	0,000318	0,000647	0,00189
ikä, v	-0,0652	0,0045	-0,074	-0,0564
1/(ikä + 1)	-3,6159	0,3497	-4,3014	-2,9304
kylvö	-0,3348	0,0521	-0,4369	-0,2326
mänty pääpuulajina	-0,3351	0,0499	-0,4329	-0,2372
havupuu pääpuulajina	-2,0618	0,0979	-2,2537	-1,8699
OMaT	-0,3106	0,1445	-0,5938	-0,0274
VT	-0,6086	0,0494	-0,7054	-0,5118
CT-	-1,6073	0,1065	-1,8161	-1,3985
räme	0,4552	0,0875	0,2837	0,6267
ylispuusto	-0,4266	0,0500	-0,5246	-0,3286
GTK savi	-0,2985	0,1007	-0,4959	-0,101
GTK karkearakeinen	-0,3281	0,0684	-0,4622	-0,194
TWI_MEAN	0,0431	0,0123	0,0190	0,0672
perkaus/(Th_aika + 1)	-0,8566	0,2041	-1,2567	-0,4566
harvennus/(Th_aika + 5)	-5,1254	0,3633	-5,8375	-4,4133

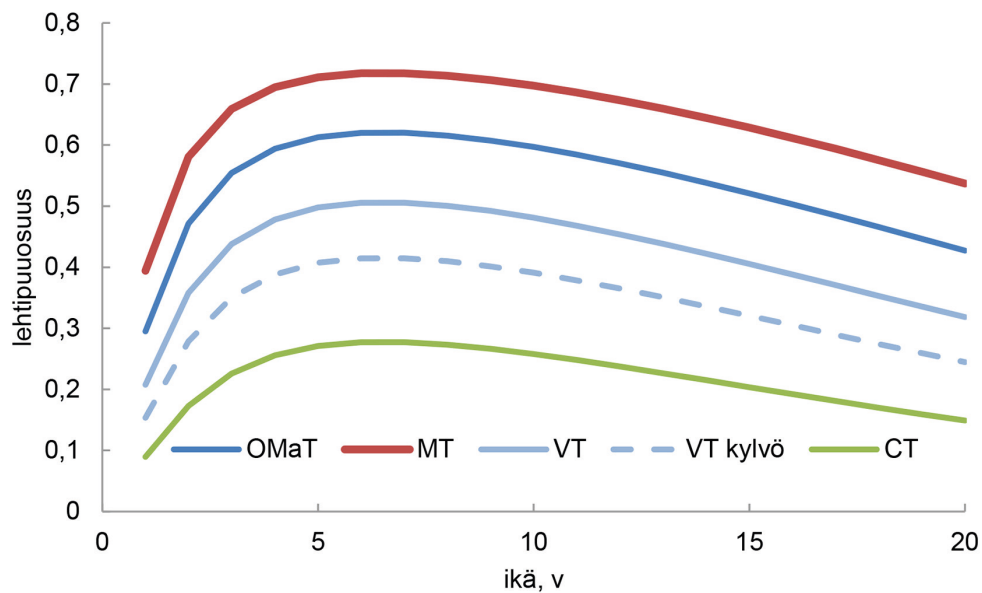
Th_aika = aika viimeisestä taimikonhoitotoimenpiteestä; TWI_MEAN = topografisen kosteusindeksin keskiarvo

malliin ei jäänyt muuta kuin ”räme” turvemaita kuvaavista muuttujista. Istutuksen vaikutus jäi pois, mutta kylvön lehtipuuosuutta pienentävä vaikutus oli suurempi kuin edellisessä mallissa (vrt. Taulukot 8 ja 10). Kosteusindeksin TWI_MEAN kasvaessa lehtipuuosuus kasvoi, mutta vaikutus oli selvästi aikaisempia malleja pienempi. Lehtipuuosuuden keskimääräinen ennuste oli 0,505 ja painotettu RMSE oli 0,237, kun taimikonhoidon toimenpiteet olivat mallissa mukana.

Esimerkissä kuvattiin lehtipuun osuutta, kun sijaintimuuttujat saivat aineiston keskiarvot lämpösumma 1100 °Cv_{rk}, etäisyys mereen 120 km, korkeus merenpinnan yläpuolella 130 m. Lehtipuuosuus oli suurimmillaan taimikon iän ollessa 7 vuotta (Kuva 6). Esimerkissä kylvetyn mäntytaimikon kuivahkon kankaan lehtipuuosuus oli suurimmillaan 41 % (Kuva 6). Heti 6-vuotiaassa taimikossa tehdyn perkauksen jälkeen se oli 21 % ja 12-vuotiaassa taimikossa tehdyn harvennuksen jälkeen 17 % tai molempien toimenpiteiden yhteydessä 15 % (Kuva 6). Kasvupaikan ja puuston syntyvän vaikutus lehtipuuosuuteen oli huomattava. Kuvan 7 esimerkissä on keskimääräinen lehtipuuosuuden kehitys ilman taimikonhoitoa eri kasvupaikoilla. Suurimmillaan lehtipuuosuus oli tuoreilla kankailla 72 %, kun luontaisesti syntyneillä tai kylvetyillä kuivahkoilla kasvupaikoilla se oli suurimmillaan 51 % ja 41 % ja kuivalla kasvupaikalla 28 % (Kuva 7). Kylvössä lehtipuuosuutta pienensi männyn suuri runkoluku ja kuivalle kankaalle kylvö tuottaisi mallin mukaan suurimmillaan 21 % lehtipuuosuuden.



Kuva 6. Lehtipuun osuus taimikon iän funktiona hoidetuissa ja hoitamattomissa kuivahkon kankaan kylve-tyssä mäntytaimikoissa ennustettuna aineiston keskiarvoilla (lämpösusma 1100 °Cvirk, merietäisyys 120 km, korkeus 130 m merenpinnasta). Varhaisperkaus on tehty 6 vuotta ja harvennus 12 vuotta taimikon perustamisen jälkeen.



Kuva 7. Kasvupaikan vaikutus lehtipuuston suhteelliseen osuuteen, kun kasvupaikat kuvaavat havu-puulle perustettuja taimikoita: OMaT ja MT ovat kuusen- ja VT ja CT mäntytaimikoita. VT-taimikko kuvattiin lisäksi männyn kylvötaimikkona.

3.3.2 Uudistamisketjun ja taimikonhoidon vaikutus keskipituuteen

Pituusmallit laadittiin erikseen havu- ja lehtipuuston keskipituudelle ja näissäkin luokissa huomiointiin puulajeittaisia eroja kuusen ja koivun välillä. Keskipituudessa kasvupaikan vaikutukset olivat hyvin selvät, varsinkin havupuilla tuoretta kangasta huonommilla kasvupaikoilla (Taulukko 11). Mallien perustasot kuvasivat pintamuokattuja uudistusaloja. Muokkausmenetelmistä auraus on voimakkain toimenpide ja sen estimoitu vaikutus oli 16 %. Käytännössä aurausta tehdään enää harvoin ja ainoastaan Pohjois-Suomessa. Muokkaamattomilla aloilla oli keskimäärin vain 3 % hitaampi pituuskehitys odotusarvoon verrattuna (Taulukko 11). Todennäköisesti muokkaamattomat alat eivät olleet erityisen vaikeasti uudistettavia kohteita. Taimikon perkaus ei vaikuttanut havupuuston keskipituuteen, mutta harvennuksella oli positiivinen vaikutus. Turvemailla keskipituus oli noin 10 % pienempi, mutta ojituksella siihen voitiin vaikuttaa. Koska ojitus kuvattiin kahdella tunnuksella, joista toisen vaikutus oli negatiivinen ja toinen positiivinen, tarkastellaan ojituksen vaikutusta myöhemmin kuvan avulla. Kosteusindeksin TWI_MEAN kasvaessa keskipituus pieneni (Taulukko 11). Havupuuston keskipituuden selitysaste OLS mallissa oli $R^2=87,3\%$. Sekamallin varianssikomponentit olivat $v_u=0,0258$ ja $v_e=0,1022$ ja siten RMSE oli 0,3577. Takaisinmuunnoksen yhteydessä harhan korjausermi $(0,0258 + 0,1022)/2$ eli 0,0640 tulee lisätä vakioon.

Lehtipuuston keskipituuden kehitys oli ehkä haastavin mallitettava, koska toimenpiteet voivat toisaalta pienentää pituutta, kuten perkaus ja harvennus havupuutaimikossa tai mahdollisesti suurentaa pituutta, kun toimenpiteet tehdään lehtipuutaimikoissa. Lopulta toimenpiteet kuvattiin kahdella osoitinmuuttujalla, jotka molemmat kuvasivat lehtipuuston perkausta ja harvennusta kuusen taimikossa. Kuusen suhteellisen hitaan pituuskehityksen takia lehtipuustoa jouduttiin hoitamaan etukasvuisia lehtipuita poistaen, jolloin vaikutukset olivat negatiivisia (Taulukko 12).

Taulukko 11. Havupuuston logaritmisesti keskipituuden sekamalli.

Selittäjä	Estimaatti	Hajonta	t-arvo	P > t
vakio	-6,8981	0,2853	-24,18	<0,0001
ln(lämpösumma), °Cvrk	1,451	0,04074	35,62	<0,0001
1/(ikä + 7)	-44,5296	0,2999	-148,47	<0,0001
kuusi/ikä	0,4772	0,07914	6,03	<0,0001
kuusi	-0,5019	0,018	-27,89	<0,0001
istutus	0,4683	0,01491	31,41	<0,0001
kylvo	0,3006	0,01601	18,78	<0,0001
OMT+	0,07163	0,01469	4,88	<0,0001
VT	-0,1953	0,01327	-14,71	<0,0001
CT-	-0,4286	0,02324	-18,44	<0,0001
korpi tai räme	-0,1041	0,02861	-3,64	0,0003
GTK soistuma	-0,1151	0,02825	-4,07	<0,0001
GTK karkearakeinen	-0,05001	0,01807	-2,77	0,0057
GTK lajittunut maalaji	0,04445	0,01173	3,79	0,0002
muokkaamaton	-0,0274	0,01435	-1,91	0,0563
auraus	0,159	0,02706	5,87	<0,0001
TWI_MEAN	-0,01241	0,00335	-3,71	0,0002
ojitus/(aika ojituksesta + 1)	-0,5498	0,2202	-2,5	0,0126
ojitus/(aika ojituksesta + 10)	2,7034	1,069	2,53	0,0115
taimikonhoito	0,1178	0,0123	9,58	<0,0001

TWI_MEAN = topografisen kosteusindeksin keskiarvo

Taulukko 12. Lehtipuuston logaritmisien keskipituuden sekamalli.

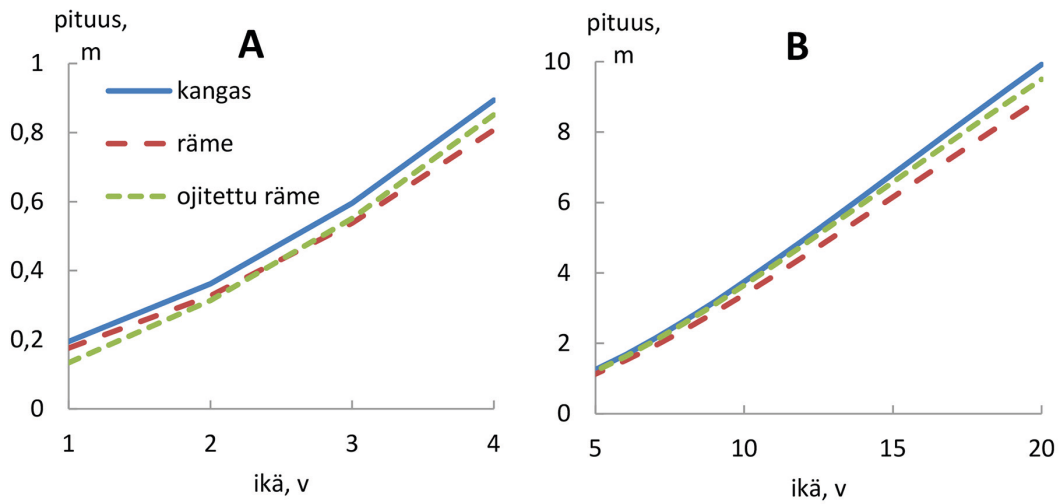
Selittäjä	Estimaatti	Hajonta	t arvo	P > t
vakio	-10,578	0,5155	-20,52	<0,0001
ln(lämpösumma), °Cvrk	1,8762	0,07307	25,68	<0,0001
1/(ikä + 7)	-32,201	0,4208	-76,52	<0,0001
koivu × ln(ikä)	0,1586	0,01496	10,6	<0,0001
viljely	0,1838	0,01905	9,65	<0,0001
koivun istutus	0,2995	0,08493	3,53	0,0004
OMT+	0,08346	0,02048	4,07	<0,0001
CT-	-0,1579	0,05077	-3,11	0,0019
korpi tai räme	-0,0507	0,02633	-1,92	0,0545
GTK paksu turvekerros	-0,0602	0,03415	-1,76	0,078
GTK hienojakoinen	0,07157	0,03568	2,01	0,045
GTK lajittunut	0,05994	0,0183	3,28	0,0011
auraus	0,1104	0,0479	2,3	0,0213
TWI_MEAN	-0,0088	0,00538	-1,63	0,1033
perkaus kuusentaimikossa	-0,1447	0,04955	-2,92	0,0035
harvennus kuusentaimikossa	-0,2226	0,02814	-7,91	<0,0001

TWI_MEAN = topografisen kosteusindeksin keskiarvo

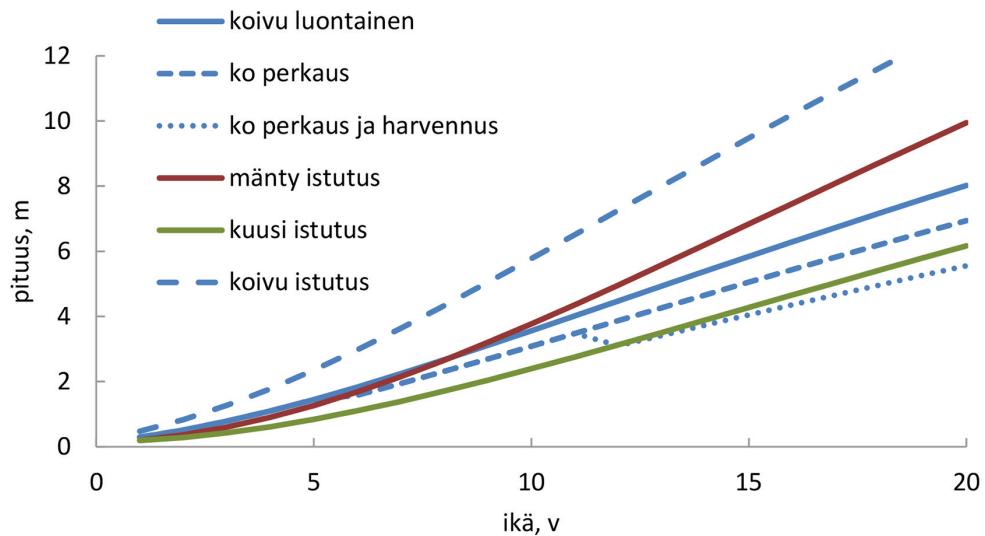
Lehtipuun keskipituus oli suurempi viljelytaimikoissa (0,18), oli viljelty puulaji mikä tahansa ja erityisen voimakas vaikutus oli koivun viljelyllä (0,30), jonka vaikutus tulee edellisen viljelyvaikutuksen lisäksi (Taulukko 12). Viljelty koivu oli aina rauduskoivua kankailla ja hieskoivua turvemailla. Koivua (raudus- ja hieskoivu) tarvittiin myös iän kuvauksessa ”koivu × ln(ikä)”. Muuten lehtipuulajit (raudus- ja hieskoivu, haapa (*Populus tremuloides* Michx.) ja harmaaleppä (*Alnus incana* (L.) Moench) eivät olleet merkitseviä erillisinä osoitinmuuttujina. Kasvupaikoista vain lehtojen ja lehtomaisten kasvupaikkojen (OMT+) positiivinen vaikutus ja toisaalta kuivien ja sitä huonompien kasvupaikkojen (CT-) negatiivinen vaikutus tulivat malliin mukaan (Taulukko 12). Kosteusindeksin TWI_MEAN kasvaessa lehtipuun keskipituus pieneni. Tämä oli ainoa malli, jossa kosteusindeksin TWI_MEAN merkitsevyys jäi tilastollisesti vain marginaaliseksi ($p=0,08$). Se jätettiin malliin, koska siten lehtipuun keskipituus oli paremmin vertailukelpoinen havupuun keskipituuteen. Lehtipuuston keskipituuden selitysaste OLS mallissa oli $R^2=62,6$ %. Sekamallin varianssikomponentit olivat $v_u=0,0427$ ja $v_e=0,2343$ ja RMSE 0,5263. Takaisinmuunnoksen yhteydessä harhan korjaustermi $(0,0427 + 0,2343)/2$ eli 0,1385 tulee lisätä vakioon.

Aika ojituksesta vaikutti keskipituuteen siten, että tuoreilla, enintään 2 vuotta vanhoilla ojituksilla vaikutus oli negatiivinen (Kuva 8A), mutta kääntyi sen jälkeen positiiviseksi (Kuva 8B). Lopulta keskipituuden ero kankailla ja ojitetuilla turvemailla jäi melko pieneksi. Kuvan 8 esimerkki laskettiin männyn pituuskehitykselle MT-kankaalla ja vastaavalle ojitamattomalle sekä ojitetulle rämeelle, kun taimikot olivat hoidettuja.

Puulajien välisiä eroja oli vaikea tulkita keskipituuden malleista suoraan, koska puulaji vaikutti sekä mallin vakioon (puulajit osoitinmuuttujina) että erilaiseen iänmukaiseen kehitykseen ja koska lehti- ja havupuut tehtiin erillisillä malleilla. Tarkastellaan eri puulajien keskipituuden kehitystä muokatuilla istutusaloilla Etelä-Suomessa (1200 °Cvrk) tuoreella kankaalla. Kuusen keskipituus jäi yllättävän paljon jälkeen männyn keskipituudesta (Kuva 9). Luontaiset koivut saivat heti alussa etumatkan istutettuihin havupuihin verrattuna ja koivun keskipituus oli männyn edellä n. 8 vuoden ajan. Vain perkaus ja harvennus yhdistämällä koivun keskipituutta saatiin hillittyä kuusen keskipituuden tasolle (Kuva 9). Istutettu raudus- tai hieskoivu oli ylivoimainen pituuskehityksessä. Esimerkiksi 20-vuotiaassa taimikossa rauduskoivun keskipituus oli mallin mukaan istutettuna 13,0 m, luontaisena 8,0 m, kun istutetun männyn keskipituus oli samanikäisenä 9,9 m ja kuusen 6,2 m.



Kuva 8. Männyn pituuskehitys hoidetuissa taimikoissa tuoreella kankaalla ja vastaavalla rämeellä ojittamatta ja ojitetuna (Kuva A: ikä 1–4 vuotta ja B: ikä 5–20 vuotta).



Kuva 9. MT-kankaalla istutetun männyn, kuusen ja koivun pituuskehitys sekä luontaisen koivun pituuskehitys ilman hoitoa, perattuna sekä parattuna ja harvennettuna. Varhaisperkaus on tehty 6 vuotta ja harvennus 12 vuotta taimikon perustamisen jälkeen.

4 Tulosten tarkastelu

VMI11-aineistoon sovitettujen biometristen mallien lähtötietojen taso vaihteli. Mallien luotettavuus hieman parani lähtötietojen tarkentuessa avointen karttapohjaisten tietolähteiden kasvupaikkaa ja kosteutta/topografista asemaa kuvaavista tunnuksista VMI11-aineiston kasvupaikkatunnuksiin ja edelleen tietoon uudistamisketjusta ja taimikonhoidon toimenpiteistä sekä ojitusta kuvaavista tunnuksista.

Koska GTK:n rakennustekninen pintamaan maalajiluokitus perustui suhteellisen suureen kuviokokoon ja VMI:n maalajiluokitus koealalta otettuun neljään näytteeseen, tämä voi selittää luokituksessa havaittuja huomattavia eroja. Selkeä ero oli myös pintamaan näytteenottosyvyydessä, joka edellisessä oli 0,4–0,9 m ja jälkimmäisessä 0,1–0,3 m. Näytteenottosyvyyden takia GTK-luokituksen kalliomaata oli varsin yleinen luokka. Maalajivertailussa GTK-luokituksen kalliomaahan sijaan kalliopaljastumaa verrattiin VMI-luokituksen kalliomaahan, jossa hyväksyttiin alle 10 cm:n pintamaakerros. Suuria eroja GTK-luokituksen ja maastoinventoinnin väliltä on raportoitu aikaisemminkin. GTK:n karttatieto osui oikeaan 59 %:lla Hyytiälässä ja 35 %:lla Orivedellä koealojen maastoinventointiin verrattuna (Räsänen ym. 2013). Toisaalta maalajin vaihtelun pienipiirteisyydestä kertoo se, että maaperäkartan pintamaan kuvaus sisälsi tyypillisesti useita maalajeja VMI11-koealan keskipisteestä 9 m:n säteellä poimittuna. Pintamaan eri maalajien osuuksia ei tässä tarkastelussa tunnettu eikä maalajeja kuvattu osuuksien mukaisessa järjestyksessä. Nämä puutteet vaikeuttivat GTK-tunnusten käyttöä silloin, kun koealalla oli useita maalajeja.

Kosteusindeksin (TWI) ja topografisen luokituksen välillä havaittiin selvä yhteys (Kuva 1). Metsätalon korjuukelpoisuustutkimuksessa (ks. Räsänen ym. 2013; Kuva 4) TWI-arvot seurasivat vielä paremmin vastaavaa topografista luokittelua kuin VMI11:n taimikoissa. Osittain tämä saattoi johtua siitä, että Räsänen ym. (2013) tutkimuksessa TWI oli laskettu pienemmällä 2 m × 2 m rasterikoolla. Tavanomaisten kasvupaikkojen osalta topografiset kosteusindeksit saivat pääasiassa loogisia arvoja eli parempi kasvupaikka oli myös kosteampi. Kuivat kankaat saivat lehtomaisia kankaita vastaavia TWI:n arvoja ja harvalukuiset karukkokankaat saivat suurimpia kosteusindeksien arvoja. Karukkokankaita osui rinteiden alaosiin ja niiden lähiympäristössä oli mm. ojitettuja soita. Alarinteissä topografinen kosteusindeksi saa suuria arvoja, mutta jos maalaji on lajittunut, se läpäisee helposti vettä ja kasvupaikka on siksi kuiva tai karu. Samoissa karttakuvissa karukkokankaiden läheisyydessä saattoi nähdä sekä ojitettuja turvemaita että hiekkamaita indikoivia sora-kuoppia. Vaihtelu oli siten hyvin pienipiirteistä. Koska TWI ei sisällä tietoa maalajista, se kuvasi taimikon asemaa valuma-alueen sisäisessä topografiassa, mutta ei sinänsä kasvupaikkaluokkien välisiä eroja. Alustavissa malleissa TWI valittiin askeltavassa regressiossa topografisten luokkien sijaan. Järvenpää (2016) puolestaan päätyi topografiseen luokitukseen TWI:n asemesta kuusen pituuden varhaiskehityksen malleissa. Kosteusindeksi tuli mukaan kaikkiin malleihin ja estimoitu vaikutus oli positiivinen runkoluvun ja lehtipuusuuden malleissa ja negatiivinen pituusmallissa. Siten topografinen asema rinteiden yläosassa oli pituuskehityksen kannalta parempi kuin alarinteessä tai notkossa. Tämä tulos oli yhdenmukainen Järvenpään (2016) tulosten kanssa topografista luokitusta käyttäen. Tässä yhteydessä jäi selvittämättä TWI-tunnusten laskennassa rasterikoon merkitys. Hilakoko 16 × 16 m oli varsin karkea tähän tarkoitukseen. Tarkalla topografisella kartalla ja pienemmällä rasterikoolla TWI:n laskennassa voisi saada tarkemman kuvauksen ja riippuvuus kasvupaikan ominaisuuksiin kenties tarkentuisi (Tenenbaum ym. 2006).

Hoitamattomien taimikoiden kokonaisrunkoluvun (kasvupaikan potentiaalinen tiheys) selityksasteet nousivat avointen tietolähteiden tiedosta VMI11-aineiston kasvupaikan kuvaukseen siirryttäessä 16,6 %:sta 19,0 %:iin. Taimikonhoidon historiatuntemuksen avulla selityksaste oli 22,4 % koko mallitusaineistossa. Laadituissa malleissa yhteisiä selittäjiä olivat taimikon sijaintia kuvaavat tunnuksien eli lämpösumma, korkeus meren pinnasta ja lähin etäisyys mereen sekä näiden

lisäksi taimikon ikä. Em. tunnuksille estimoidut parametrit olivat hyvin lähellä toisiaan, vaikka muut selittävät muuttujat vaihtelivat eri mallivaihtoehtoisissa. Näistä lämpösumma ja taimikon ikä olivat hyvin tärkeitä tunnuksia ja ne valittiin askeltavan regression alkuvaiheessa. Vain taimikon harvennus valittiin ennen näitä tunnuksia ns. ”täydellisen tiedon” vallitessa.

Mallien perustasoa vastannut tuore kangas osoittautui erittäin taimettumisalttiiksi. Tätä paremmilla kasvupaikoilla kokonaisrunkoluku oli selvästi pienempi lehdossa ja hieman pienempi lehtomaisilla kankailla. Vastaava tulos oli havaittavissa myös Miinan ja Saksan (2006, 2008, 2013) tutkimuksissa hyvin nuorissa taimikoissa. Tulos johtunee nopeasta pintakasvillisuuden kehityksestä parhailla kasvupaikoilla. Muokkausjälki peittyy nopeammin ja rehevä pintakasvillisuus rajoittaa taimettumista ja taimien kehitystä (Örlander ym. 1996; Nilsson ja Örlander 2003; Miina ja Saksa 2006, 2013). Pienempialaisissa kokeissa on saatu myös poikkeavia tuloksia. Esim. Lehtosalon ym. (2010) mukaan lehtomaisille kankailla syntyi enemmän luontaista koivua kuin tuoreen kankaan mätästetyille kuusen istutusaloille. Siipilehto ym. (2015) ei havainnut merkitsevää eroa lehtipuun määrässä näiden kasvupaikkojen välillä.

Kokonaisrunkoluvun ja lehtipuun osuuden mallit käyttäytyivät hyvin samankaltaisesti (Kuvat 5 ja 6). Tämä on ymmärrettävää, koska taimikon dynamiikka johtuu suurelta osin lehtisekapeustosta. Tähän liittyy taimikon taimettumisalttius, joka riippuu kasvupaikasta, topografiasta ja maanpinnan käsittelystä. Aineistossa oli kuvattuna muokkausta erilaisin tunnuksin (muokkaamaton, pintamuokkaus, syvämuokkaus tai maanmuokkaustavat: äestys, laikutus, mätästys, auraus), mutta lopulta vain muokkaamaton tuli valittua runkolukumalleihin tilastollisesti merkitsevänä (vrt. Miina ja Saksa 2006, 2013; Siipilehto ym. 2015). Muokkaamattomuus merkitsi 16–20 % pienempää kokonaistiheyttä. Muokkaamattomuuden ja taimikon iän välillä havaittiin huomattava korrelaatio. Tämä voi tarkoittaa sitä, että muokkaukset ovat yleistyneet, mutta myös sitä, että aikaisemmin vallalla olleita pintamuokkauksia ei aina havaittu varttuneissa taimikoissa. Paljastuneen kivennäismaan osuus on ollut merkittävä tekijä taimettumisen kannalta ja eri muokkausmenetelmillä siinä on suuria laskennallisia eroja (10–27 %), jotka saattavat täysin hävitä käytännössä (Laine ym. 2019). Esimerkiksi kääntömätästyksessä paljastetaan laskennallisesti vain 10 % kivennäismaata, mutta Hallsbyn ja Örlanderin (2004) tutkimuksessa rikotun maanpinnan osuus nousi kääntömätästyksessä jopa 50 %:iin. Muokkausten välisiä eroja vähentää hakkuun ja hakkuukoneiden sekä myöhemmin muokkauskoneiden pyörien tai telojen paljastama maa, jonka osuus voi olla hyvinkin merkittävä ajourien sijoittelusta tai ajokerroista riippuen (Kubin ym. 2012).

Toisaalta sekä varhaisperkauksen että taimikon harvennuksen jälkeinen vesapuuston syntyminen ja kehittyminen ajan suhteen olivat hyvin määrääviä taimikon tilaa kuvaavia tekijöitä. Etenkin varhaisperkauksen jälkeinen tiheyden nopea kasvu oli silmiinpistävä. Harvennuksen jälkeen tiheys ei kasvanut yhtä nopeasti. Myös Siipilehdon ym. (2015) mukaan uutta puustoa syntyi sitä vähemmän, mitä myöhemmin harvennus tehtiin. Vähän vastaava ilmiö oli soiden ojitus. Tuoreilla ojitusaloidilla tiheys laski hetkellisesti alle ojitamattoman suon tiheyden, koska puustoa poistetaan ojien ja ojamaiden vaatimalta pinta-alalta. Hyvän taimettumisalttiuden vuoksi tiheys kasvoi nopeasti, koska kuivahtava rahkasammal on hyvä taimettumisalusta (Hökkä ja Laine 1988; Sarkkola ym. 2003, 2004, 2005). Puuston sulkeutuessa runkoluku lähti laskemaan ojituksesta kuluneen ajan kasvaessa (Sarkkola ym. 2003, 2004). Valtaosa ojituksista oli uudisojituksia (60 %), joista vähintään 30 vuotta vanhoja oli 55 %. Ojien perkausta (20 %) ja täydennysojitusta (13 %) oli tehty merkittävässä määrin ennen taimikon perustamista. Aika ojituksesta huomioitiin runkoluvun mallissa jatkuvana muuttujana muodossa ”ojitus/(aika ojituksesta + 1)”.

Puustotunnukset ovat tyypillisesti tulomuotoisesti toisistaan riippuvia, kuten esim. pohjapinta-ala on runkoluvun ja keskilämpimän neliön tulo. Kun mallit linearisoidaan logaritimuunnoksilla ja estimoidaan yhtäaikaaisesti ns. SUR-mallina (seemingly unrelated regression), saadaan estimoitujen mallien lisäksi jäännösvirheiden kovarianssimatriisi. Siipilehto (2006, 2011) on hyödyntänyt tätä

ominaisuutta kalibroimalla tuntemattomat puustotunnukset tunnettujen puustotunnusten avulla. Kuitenkin, kun malleja laadittiin kuvaamaan pelkästään taimikkovaihetta, keski- ja valtapituuden välinen korrelaatio oli voimakas, mutta tiheyden ja pituuden välillä korrelaatiot jäivät heikoiksi (Siipilehto ym. 2015). VMI11-aineistossa keskipituuden ja runkoluvun mallien jäännösvirheiden väliset korrelaatiokertoimet olivat myös heikkoja, $r=0,002$ havupuilla ja $r=0,06$ lehtipuilla. Tästä syystä yhdessä estimoitavaa SUR-mallia ei pidetty tarpeellisena, kun ennustettiin runkolukua ja keskipituutta ”täydellisen tiedon” vallitessa. Pituuden iänmukaisen kehityksen kuvauksessa on aikaisemmin käytetty muunnosta $1/(ikä + 10)$ (Siipilehto ym. 2015; Järvenpää 2016). VMI11-aineistossa $1/(ikä + 7)$ osoittautui parhaaksi muunnokseksi taimikoiden keskipituusmallissa. Vakion lisäyksellä iän käänteislukuun voitiin välttää harha, joka olisi ilmeinen käytettäessä muunnosta $1/ikä$ aivan nuorimmissa ja etenkin 1-vuotisissa taimikoissa. Kuitenkin, kun havupuiden pituusmallissa kuvattiin männyn ja kuusen eroa, niin kuusen kohdalla $1/ikä$ kuvasi tehokkaasta kuusen hitaampaa alkukehitystä verrattuna mäntyyn. Runkoluvun ja iän epälineaarisen riippuvuuden kuvaus onnistui parhaiten muuttujilla $ikä$ ja $1/(ikä + 1)$.

Edes taimikonhoito- ja ojitustiedon tuntemus ei taannut kokonaisrunkolukuennusteen luotettavuutta. Selitysaste R^2 oli 22,4 % ja RMSE oli 0,706, kun vastaavat luotettavuustunnukset vaihtoehdossa 2 olivat 19,0 % ja 0,712. Koska hoitamattomien taimikoiden malleissa ja koko aineistosta laadituissa ”täydellisen tiedon” malleissa on eri aineisto, eivät virhetermit ja erityisesti selitysasteet ole täysin vertailukelpoisia keskenään. Vertailukelpoisuus pienenee erityisesti silloin, kun osa-aineisto supistaa mallin vaihtelualueetta, esimerkiksi ikävaihtelua, jolloin selitysaste pienenee (Mehtälö ja Lappi 2020). Hoidettujen taimikoiden puustotunnusten vaihtelu mahtui hoitamattomien taimikoiden vaihtelun sisään (Taulukko 2), mutta keskitiheydet olivat hoidetuissa taimikoissa pienempiä. Tätä muutosta saatiin kuvattua taimikonhoidolla ja sen ajankohdalla siten, että selitysaste kasvoi ja virhevaihtelu pieneni. Taimikoiden tunnuksiin liittyy tyypillisesti paljon selittämätöntä vaihtelua ja kaiken kaikkiaan vaihtelu on hyvin suurta. Tässäkin aineistossa mallitettujen runkolukujen variaatiokertoimet olivat yli yhden, eli hajonta oli keskiarvoa suurempi (Miina ja Saksa 2006; Miina ja Saksa 2013). Osa vaihtelusta voi liittyä erilaisiin siemenvuosiin, lämpöoloihin ja sadantaan, joita ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu. Myös maaperän ominaisuuksien vaihtelu voi olla pienipiirteistä (Järvinen ym. 1993; Levula ym. 2004).

Puulajien pituusvertailuissa huomiota herätti kuusen huomattavasti mäntyä hitaampi pituuskehitys (Kuva 9). Toisaalta tulos, jossa tuoreen kankaan istutettu kuusi ja luontainen mänty kehittyivät samaa vauhtia, vastasi tuoretta mänty-kuusisekametsätutkimuksen tulosta (Simone Bianchi, Luonnonvarakeskus, käsikirjoitus 2020). Nykyaikaisen kuusen uudistamismenetelmän (paakkutaimen istutus mättääseen) on todettu nopeuttavan kuusen pituuskehitystä huomattavasti (Saksa ym. 2005; Lehtosalo ym. 2010; Siipilehto ym. 2015). VMI11-aineistosta saatu pituuskehitys vastasi lähes Saksan ym. (2005) ja Siipilehdon ym. (2015) tuloksia, kun valittiin sama kasvupaikka ja lämpösumma. VMI11-aineistossa mätästys ei vielä ollut valtamenetelmä vaan pintamuokkauksia (äestys ja laikutus) käytettiin mätästystä enemmän myös kuusen uudistusaloilla. Sama tilanne on raportoitu VMI10-aineistosta (Korhonen ym. 2010). Lisäksi sellaiset kuusentaimikot, jotka oli istutettu mätästyskohteille, olivat vielä keskimääräistä nuorempia.

Keskipituuden selitysasteet olivat 87,2 % ja 62,9 % havu- ja lehtipuustolle. Lehtipuuston keskipituuden mallinnusta vaikeuttivat taimikoissa tehtävät hoitotoimenpiteet, jotka voivat olla hyvin erilaisia lehti- ja havupuuvaltaisissa taimikoissa. Lopulta loogisin malli saatiin aikaiseksi kuvaamalla kuusentaimikoissa lehtipuuston perkauksen ja harvennuksen negatiivista vaikutusta keskipituuteen osoitinmuuttujien avulla. Hoitotoimenpiteiden vaikutukset mäntytaimikossa tai lehtipuutaimituksessa eivät tulleet keskipituuden malliin mukaan. Kuvan 3 mukaan havupuuvaltaisen taimikon harvennuksen jälkeen havupuusto oli keskimäärin lehtipuustoa pidempää. Koska koivu on yleisin taimikonhoidossa jätettävä lehtisekapuu, verrattiin luontaisen koivun pituuskehitystä

istutetun männyn tai kuusen pituuskehitykseen. Vertailun perusteella koivun perkaus etukasvuksia poistaen ei ollut yhtä tarpeellista mänty- kuin kuusentaimikoissa. Istutetun männyn keskipituus vastasi melkein luontaisen koivun pituuskehitystä (Kuva 9). Sen sijaan istutetun kuusen keskipituus jäi jälkeen harvennetun koivun (etukasvuisten koivujen poisto) keskipituudesta (kuva 9), mikä viittaisi hieman ohjeita varovaisempaan taimikonhoitoon. Toisaalta, jos taimikko on yhtään hallanarka, on hieman kuusta pidempi lehtipuusto perusteltavissa. Osittain tulos johtunee sekä reikäperkauksista, joita havaittiin 53 kuusitaimikoissa, että vertailusta koivuun, joka oli lehtipuista nopeakasvuisin.

Harvennus vaikutti positiivisesti havupuuston keskipituuteen. Kun se kuvautui yhdessä harvennuksen ajankohdan kanssa, niin sen vaikutus oli kutakuinkin vakio iän suhteen. Jos se olisi kuvautunut osoitinmuuttuja, se olisi vaikuttanut pituuskehityksen kulmakertoimeen, eli vaikutus olisi kasvanut vuodesta toiseen. Myös ojituksella oli positiivinen vaikutus havupuuston keskipituuteen ja lopulta ojitettujen turvemaiden havupuuston keskipituus vastasi lähes kangasmaiden pituuskehitystä (Kuva 8). Kuitenkin aivan nuorilla ojitusalilla keskipituus hieman pieneni (Kuva 8). Ojituksella ei sinänsä ole puutasolla negatiivista vaikutusta, mutta tuoreen ojitusalan voimakas taimettuminen pienentää keskipituutta. Tulos vastasi Siipilehdon ym. (2014) kangas- ja turvemaataimikoiden pituuskehityksen vertailun tulosta.

”Täydellisen tiedon” vallitessa oletettiin uudistamisketju hyvin tarkasti tunnetuksi. Tarvitavat tiedot sisältyvät metsänkäyttöilmoitukseen, joka tulee tehdä ennen varsinaisia taimikon perustamistöitä. Tosin tarkkaa toimenpiteiden ajoitusta ei metsänkäyttöilmoitus kerro. Sen sijaan taimikon perustamisilmoituksesta se olisi saatavilla, mutta perustamisilmoitusmenettelystä luovuttiin vuodesta 2014 lähtien. Kummattaan tiedot eivät ole täysin luotettavia. Kalin (2010) tutki metsänkäyttöilmoituksen ja perustamisilmoituksen yhdenmukaisuutta Häme-Uusimaan metsäkeskuksen toimialueella vuosina 2000–2006 ja totesi metsän uudistamisen toteutuneen kuitenkin pääosin suunnitellun mukaisesti.

Tyypillisesti kivennäis- ja turvemaille laaditaan erillisiä puuston kehitystä kuvaavia malleja. Tässä tutkimuksessa päädyttiin laatimaan yhteiset mallit sekä kivennäis- että turvemaille. Tämä johtui siitä, että jakamalla aineisto näihin osiin, ei mallien luotettavuus olisi oleellisesti parantunut ja samalla mallien määrä olisi kaksinkertaistunut. Sen sijaan metsävarakartan pohjalta arvioitaessa taimikonhoitotarvetta, kivennäismaille saatiin oleellisesti parempia tuloksia kuin turvemaille (Pesonen ym. 2007). Laadittuja malleja voidaan käyttää sellaisenaan hoitamattoman taimikon potentiaalisen tilan tai ”täydellisen tiedon” mukaisen taimikonhoidollisen tilan ennustamiseksi. Lisäksi mallit voivat olla myös pohjatietoa esim. laserkeilausperusteiselle mallin kalibroinnille (Hou ym. 2019).

Avoimien karttapohjaisten tietolähteiden kosteus- ja maaperätunnuksille ladattiin paljon odotuksia taimikoiden tunnuksia mallitettaessa. GTK:n maaperäkartan pintamaan tunnuksista valikoitui malleihin vain 2–3 tunnusta suuresta joukosta maalajien ja turpeiden tunnuksia. Kaikissa malleissa näitä tunnuksia oli kuitenkin mukana. Kosteusindeksistä keskiarvo tuli malleihin mukaan tilastollisesti merkitsevänä muuttujana, kun taas taimikon topografista vaihtelua kuvannut hajontatermi ei tullut. Kosteusindeksin laskennassa pienemmän rasterikoon merkitys kasvupaikan tarkemmaksi kuvaukseksi tulisi jatkossa selvittää. Jos GTK:n maalajit poimittaisiin niiden osuuden mukaisessa järjestyksessä, voitaisiin ristiriitaisista tuloksista päästä eroon pudottamalla pienellä osuudella mukaan tulleita maalajeja tarvittaessa pois. Vaikka avoimien tietolähteiden tietoihin lisättiin VMI11-aineiston kasvupaikan ja taimikonhoidon kuvaus, jäi taimikon tiheyteen ja lehtipuuston keskipituuteen paljon selittämätöntä vaihtelua.

Mallit runkoluvulle ja keskipituudelle laadittiin lineaarisina malleina logaritmuunnoksen jälkeen. Kun selitettävään y-muuttujaan tehdään muunnos, niin takaisinmuunnoksessa joudutaan käyttämään harhakorjaustermiä. Tämä voi olla huolestuttava piirre silloin, kun virhetermit ovat suuria, kuten runkoluvun kohdalla. Vaihtoehtoisesti voitaisiin käyttää myös yleistettyä lineaarista

mallia, jossa linkkifunktion avulla rajoitetaan y:n odotusarvo positiiviseksi. Olennaiset erot käytettyyn linearisoituun malliin ovat, että yleistetyssä lineaarisessa mallissa ei tarvita harhan korjausta ja varianssin heteroskedastisuus mallinnetaan varianssifunktioilla (ks. Mehtätalo ja Lappi 2020).

Datan avoimuus

Tutkimuksessa käytetty data ei ole kokonaisuudessaan avoimesti saatavilla metsänomistajien yksityisyyden ja pysyvien koelajien häiriöttömyyden turvaamiseksi. Data luovutetaan tieteelliseen tutkimuskäyttöön erityisellä sopimuksella (yhteydenotot: tietopalvelu@luke.fi). Lisätietoja osoitteessa <https://www.luke.fi/avoim-tieto/radar-tietokanta/luken-aineistopolitiikka/>.

Kiitokset

Kiitokset Aura Salmivaaralle ja Tiina Sauvula-Seppälälle avointen tietolähteiden kosteus- ja maaperätunnusten saattamisesta mallinnusaineiston vaatimaan muotoon.

Rahoitus

Tutkimusta tehtiin hankkeen ”Taimikoiden tiedonkeruun kehittäminen” osahankkeessa ”Biometrinen mallinnus ja testaus”. Hanketta rahoitti Maa- ja metsätalousministeriö (Dnro 2100/03.09.00/2015).

Lähteet

- Aaltonen VT, Aarnio B, Hyyppä E, Kaitera P, Keso L, Kivinen E, Kokkonen P, Kotilainen M, Sauramo M, Tuovila P, Vuorinen J (1949) Maaperäsanaston ja maalajien luokituksen tarkastus v. 1949. Maataloustieteellinen aikakauskirja 21: 37–66. <https://journal.fi/afs/article/view/71269/33066>. Viitattu 1.9.2020.
- Beven KJ, Kirkby MJ (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin* 24: 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>.
- Björkdahl G (1983) Höjdtveckling hos stubbskott av vårt- och glasbjörk samt tall och gran efter mekanisk röjning. Institutionen för skogsproduktion. Avdelningen för beståndsbehandling. Garpenberg. Stencil 18.
- Fern A (1990) Coppicing, aboveground woody biomass and nutrition aspects of birch with specific reference to *Betula pubescens*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 348. <http://urn.fi/URN:ISBN:951-40-1089-2>.
- Haavisto-Hyvärinen M, Kutvonen H (2007) Maaperäkartan käyttöopas. Geologian tutkimuskeskus, Espoo. http://tupa.gtk.fi/julkaisu/erikoisjulkaisu/gtk_maaperakartan_kayttoopas.pdf. Viitattu 1.9.2020.
- Hallsby G, Örländer G (2004) A comparison of mounding and inverting to establish Norway spruce on podzolic soils in Sweden. *Forestry* 77: 107–117. <https://doi.org/10.1093/forestry/77.2.107>.
- Hou Z, Mehtätalo L, McRoberts RE, Ståhl G, Tokola T, Rana P, Siipilehto J, Xu Q (2019) Remote sensing-assisted data assimilation and simultaneous inference for forest inventory. *Remote Sens Environ* 234, article id 111431. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111431>.
- Huuskonen S, Miina J (2007) Stand-level growth models for young Scots pine stands in Finland.

- Forest Ecol Manag 241: 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.12.024>.
- Hyppönen M, Hyvönen J, Valkonen S (2002) Männyn luontaisen uudistamisen onnistuminen Lapin yksityismetsissä 1960-, 1970- ja 1980-lukujen siemenpuuhakkuissa. Metsätieteen aikakauskirja 4/2002: 559–574. <https://doi.org/10.14214/ma.6195>.
- Hytönen J, Kauppi A (2000) Hieskoivun vesominen. Sorbifolia 31: 175–181. <https://doi.org/10.2307/27757849>.
- Hökkä H, Laine J (1988) Suopuustojen rakenteen kehitys ojituksen jälkeen. Silva Fenn 22: 45–65. <https://doi.org/10.14214/sf.a15498>.
- Johansson T (1992) Sprouting of 2- to 5-year-old birches (*Betula pubescens* Ehrh. and *Betula pendula* Roth) in relation to stump height and felling time. Forest Ecol Manag 53: 263–281. [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(92\)90046-C](https://doi.org/10.1016/0378-1127(92)90046-C).
- Järvenpää J (2016) Kuusen varhaiskehitys 3–15-vuotiailla kääntömätästyskohteilla – Maasto- ja paikkatietoaineistoihin perustuva pituuskehityksen mallinnus. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:hulib-201701241122>.
- Järvinen E, Hokkanen TJ, Kuuluvainen T (1993) Spatial heterogeneity and relationships of mineral soil properties in a boreal *Pinus sylvestris* stand. Scand J For Res 8: 435–445. <https://doi.org/10.1080/02827589309382790>.
- Kalin L (2010) Metsänuudistamisen toteutuminen Metsäkeskus Häme-Uusimaa toimialueella 2000–2006. Opinnäyte. Mikkelin ammattikorkeakoulu. <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201005179440>.
- Korhonen KT, Ihalainen A, Miina J, Saksa T, Viiri H (2010) Metsänuudistamisen tila Suomessa VMI10:n aineistojen perusteella. Metsätieteen aikakauskirja 4/2010: 425–478. <https://doi.org/10.14214/ma.6943>.
- Korhonen L, Pippuri I, Packalén P, Heikkinen V, Maltamo M, Heikkilä J (2013) Detection of the need for seedling stand tending using high-resolution remote sensing data. Silva Fenn 47, article id 952. <https://doi.org/10.14214/sf.952>.
- Kubin E, Hartman M, Ilvesniemi H, Lingren M, Kokko A, Murto T, Pasanen J, Piispanen J, Pohjola S, Seppänen R, Tarvainen O, Tillman-Sutela E, Tolvanen A (2013) Kantojen noston ja hakkuutähteiden keruun ekologiset ja metsänhoidolliset vaikutukset (3475). Koekenttien perustaminen ja tuloksia. Metlan työraportteja 252. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2406-1>.
- Laine T, Heiskanen J, Kankaanhuhta V (2019) Maanmuokkaus osana metsänuudistamisketjua. Julkaisussa: Laine T, Luoranen J, Ilvesniemi H (toim.) Metsämaan muokkaus: kirjallisuuskatso maanmuokkauksen vaikutuksista metsänuudistamiseen, vesistöihin sekä ekologiseen ja sosiaaliseen kestävyyteen. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 58/2019. Luonnonvarakeskus, Helsinki. s. 10–13. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-326-813-5>.
- Lehtosalo M, Mäkelä A, Valkonen S (2010) Regeneration and tree dynamics of *Picea abies*, *Betula pendula* and *Betula pubescens* in regeneration areas treated with spot mounding in southern Finland. Scand J For Res 25: 213–223. <https://doi.org/10.1080/02827581.2010.489514>.
- Levula J, Levula T, Westman CJ (2004) Männyn taimikon kehityksen suhde maan ominaisuuksiin käsittelemättömällä ja kulotetulla metsämaalla. Metsätieteen aikakauskirja 2/2004: 145–155. <https://doi.org/10.14214/ma.6245>.
- Luoranen J, Saksa T, Finer L, Tamminen P (2007) Metsämaan muokkausopas. Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoki. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2059-9>.
- McCulloch CE, Searle SR, Neuhaus JM (2008) Generalized, linear, and mixed models. 2. painos. Wiley Series in Probability and Statistics. John Wiley and Sons, Hoboken, New York.
- Miina J, Saksa T (2006) Predicting regeneration establishment in Norway spruce plantations using a multivariate multilevel model. New For 32: 265–283. <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9002-y>.
- Miina J, Saksa T (2008) Predicting establishment of tree seedlings for evaluating methods of regenera-

- tion for *Pinus sylvestris*. Scand J For Res 23: 12–27. <https://doi.org/10.1080/02827580701779595>.
- Miina J, Saksa T (2013) Predicting establishment of tree seedlings in regeneration areas of *Picea abies*. Balt For 19: 187–200.
- Miina J, Turunen J, Korhonen KT, Sandström M, Ahola A (2018) Predicting the need for tending of conifer seedling stands in southern Finland. Scand J For Res 33: 641–649. <https://doi.org/10.1080/02827581.2018.1447681>.
- Nilsson U, Örlander G (2003) Response of newly planted Norway spruce seedlings to fertilization, irrigation and herbicide treatments. Ann For Sci 60: 637–643. <https://doi.org/10.1051/forest:2003056>.
- Pesonen A, Korhonen KT, Tuominen S, Maltamo M, Lukkarinen E (2007) Taimikonhoitotarpeen arviointi valtakunnan metsien inventoinnin metsävarakartan pohjalta. Metsätieteen aikakauskirja 2/2007: 77–86. <https://doi.org/10.14214/ma.6695>.
- Pohjonen V (1991) Selection of species and clones for biomass willow forestry in Finland. Acta For. Fenn. 221. <https://doi.org/10.14214/aff.7667>.
- Räsänen T, Hämäläinen J, Lamminen S, Lindeman H, Salmi M, Väätäinen K (2013) Uudet informaatiolähteet puunhankinnan tukena. Effibre-loppuraportti. Metsätehon raportti 226. <https://www.metsateho.fi/uudet-informaatiolähteet-puunhankinnan-tukena/>. Viitattu 1.9.2020.
- Saksa T, Heiskanen J, Miina J, Jaakkola T, Kolström T (2005) Multilevel modelling of height growth in young Norway spruce plantation in southern Finland. Silva Fenn 39: 143–153. <https://doi.org/10.14214/sf.403>.
- Saksa T, Miina J, Uotila K (2016) Taimikonhoito – tavoitteet, menetelmät ja kustannukset. Metsäkustannus. ISBN 978-952-6612-82-9.
- Salmivaara A (2016) Suomen topografinen kosteusindeksi, 16m, 2016. Etsin research data finder [Dataset] <http://urn.fi/urn:nbn:fi:csc-kata20170511114638598124>.
- Salmivaara A, Launiainen S, Tuominen S, Ala-Ilomäki J, Finer L (2017) Topographic wetness index for Finland. Natural Resource Institute Finland, Etsin research data finder [Dataset] <http://urn.fi/urn:nbn:fi:csc-kata20170511113233803176>.
- Sarkkola S, Alenius V, Hökkä H, Laiho R, Penttilä T, Päivänen J, (2003) Changes in structural inequality in Norway spruce stands after water-level drawdown. Can J For Res 33: 222–231. <https://doi.org/10.1139/x02-179>.
- Sarkkola S, Hökkä H, Penttilä T (2004) Natural development of stand structure in peatland Scot pine following drainage: results based on long-term monitoring of permanent sample plots. Silva Fenn 38: 405–412. <https://doi.org/10.14214/sf.408>.
- Sarkkola S, Hökkä H, Laiho R, Päivänen J, Penttilä T (2005) Stand structural dynamics on drained peatlands dominated by Scots pine. Forest Ecol Manag 206: 135–152. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.064>.
- Siipilehto J, Saarinen M, Hökkä H (2014) Taimikoiden pituuskehityksen luotettavuus sovellettaessa MOTTI-ohjelmiston kangasmaiden ennustemalleja turvekankaille. Metlan työraportteja 294. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-40-2473-3>.
- Siipilehto J, Valkonen S, Päätaalo M-L (2015) Männyn- ja kuusentaimikoiden kehitys erilaisia metsänuudistamisketjuja käytettäessä. Metsätieteen aikakauskirja 1/2015: 5–21. <https://doi.org/10.14214/ma.6297>.
- Tarboton DG (1997) A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. Water Resour Res 33: 309–319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>.
- Tenenbaum DE, Band LE, Kenworthy ST, Tague CL (2006) Analysis of soil moisture patterns in forestland and suburban catchments in Baltimore, Maryland, using high-resolution photogrammetric and LIDAR digital elevation dataset. Hydrol Process 20: 219–240. <https://doi.org/10.1029/2005WR004137>.

[org/10.1002/hyp.5895](https://doi.org/10.1002/hyp.5895).

- Uotila K, Rantala J, Saksa T, Harstela P (2010) Effect of soil preparation method on economic result of Norway spruce regeneration chain. *Silva Fenn* 44: 511–524. <https://doi.org/10.14214/sf.146>.
- Uotila K, Rantala J, Saksa T (2011) Kustannustehokas ja kannattava metsänuudistamisketju. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2011: 35–38. <https://doi.org/10.14214/ma.5929>.
- Uotila K, Rantala J, Saksa T (2012) Estimating the need for early cleaning in Norway spruce plantation in Finland. *Silva Fenn* 46: 683–693. <https://doi.org/10.14214/sf.919>.
- Valkonen S (1997) Viljelykuusikon alkukehityksen malli. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1997: 321–347. <https://doi.org/10.14214/ma.6479>.
- VMI11 maastotyöohje (2009) koko Suomi. 2. painos. <http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe201603038534>.
- Örlander G, Nilsson U, Hällgren J-E (1996) Competition for water and nutrients between ground vegetation and planted *Picea abies*. *N Z J For Sci* 26: 99–117.

48 viitettä.