Looduslikult uuenenud lehtpuuenamusega noorte segapuistute kõrgusjaotuse dünaamika Järvselja püsiakatsealadel

Vivika Kängsepp*, Ahto Kangur ja Andres Kiviste

Kängsepp, V., Kangur, A., Kiviste, A. 2015. Tree height distribution dynamics in young naturally regenerated study plots. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 63, 100–110. ISSN 1406-9954. Journal homepage: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>

Abstract. Growth assessment of young stands gives the possibility of assessing forest site potential, tree species-dependent competition and developing realistic predictions for the following periods. The study is conducted in naturally regenerated broadleaves dominated stands in 2005 at Järvselja Training and Experimental Forest Center. The current study material is collected from 9 study plots established in three forest stands (regeneration felling years respectively 1996, 2000 and 2002). The study plots were re-measured 4–6 times respectively between the years of 2006 and 2012. The Weibull distribution function fit for empirical height distributions in consecutive years was tested and the estimated Weibull parameters were analysed. Results indicate that empirical height distributions of young regenerated forests do not fit well to theoretical distributions, but in many cases, empirical and theoretical distribution are similar. The Weibull distribution shape parameter was related to the maximum height and range of the height, and the scale parameter was related to the mean, quadratic mean and median height.

Key words: Weibull distribution, modelling, broadleaved species, young forests.

Authors' address: Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, Tartu 51014, Estonia; *e-mail: vivika.kangsepp@emu.ee

Sissejuhatus

Viimase poolsajandi jooksul on Eesti metsade pindala suurenenud enam kui poole võrra (Aastaraamat Mets..., 2014). Metsata metsamaa on uuenenud ligi 70% looduslikult ning 76% ulatuses lehtpuuga (Eesti metsad..., 2012). Järgneva paarikümne aastaga saavutab raieküpsuse kõige arvukam kaasikute põlvkond (Eesti metsanduse..., 2010), mistõttu on looduslikult uuenenud lehtpuunoorendike kujundamine väärtuslikuks metsaks Eesti metsakasvatuse tegevuse üks olulisemaid ülesandeid. Seejuures on looduslikult uuenenud noorendike arengu hindamine keeruline, sest noore puistu dünaamikas toimuvaid muutusi ning neid muutusi tekitavaid põhjuseid on palju (Franklin *et al.*, 2002).

Järvseljal on lehtpuupuistute, sealhulgas kaasikute kasvu, üksikpuu mahtu ning puistu arengut ja majandamist uurinud ning sel otstarbel püsiproovialasid rajanud teiste seas Mathiesen (1926), Tullus & Reisner (1998), Hämäläinen (2007), Kaer (2007) ja Padari *et al.* (2009).

Eestis käsitletakse noorendike kõrgust erinevana vanemate puistute kõrgusest ehk kuni noorendiku arenguklassini kirjeldatakse puistuid puuliigi, puistuelemendi keskmise kõrguse ja puude arvu kaudu, alates latimetsa arenguklassist puuliigi põhise puistuelemendi rinnaspindala, ruutkeskmise läbimõõdu ja keskmise kõrguse kaudu. Vanemate puistute kõrgus ennustatakse ruutkeskmise läbimõõdu järgi ning selle aluseks on puude rinnasläbimõõtu- de jaotus (Metsa korraldamise..., 2009).

Looduslik uuendus on tihti ebaühtlase vanusega, sest noores puistus lisandub võrade liitumise eelselt pidevalt uusi puid. Puud saavutavad rinnaskõrguse erineval ajal, mistõttu võib puistuelemendi rinnasläbimõõt olla pikemat aega väga varieeruv. Seetõttu kasutatakse noore puistu kasvu modelleerimisel tihti lihtsustatud võtteid või hoopis erinevaid tunnuseid (kõrgusjaotus, konkurentsi hinnang), kui vanemas puistus (rinnasdiameeter, mudelpuu kõrgus, rinnaspindala) (Eerikäinen *et al.*, 2007; Siipilehto, 2009).

Keskmise kõrguse kasutamine noorediku arengu hindamisel on problemaatiline eelkõige loodusliku uuenduse puhul, kus keskmine kõrgus ei ole sageli puistuelemendi kõrguse kõige iseloomulikum väärtus (Padari *et al.*, 2009). Kõrguse varieeruvust puistus kirjeldab täpsemalt kõrgusjaotus, mille kuju ja ulatus annab puistu arengust parema ülevaate ja võimaldab kasvu modelleerida.

Sellepärast on oluline teada lehtpuupuistute kujunemise ja puude kõrguste jaotumise seaduspärasusi ning seda kirjeldavaid statistilisi mudeleid. Siinse töö eesmärk oli metsa loodusliku uuenduse püsikatsealadel puude kõrgusjaotuste dünaamika analüüs, kõrvutades empiirilist jaotust teoreetilisega. Teoreetilise jaotusena kasutati varasemas uuringus (Kängsepp, 2011) kolme klassikalise jaotusseaduse (normaal-, lognormaal- ja Weibulli jaotusega) võrdluses parimat tulemust näidanud Weibulli kaheparameetrilist funktsiooni.

Materjal ja meetodika

Analüüsis kasutatavad mõõtmisandmed pärinevad 2005. aastal Järvelja Öppe- ja Katsemetskonda rajatud lehtpuu loodusliku uuendamise püsikatsealadelt. Katsealad rajati uuendusraie (aastatel 2000, 1996 ja 2002) järel looduslikult uuenenud lehtpuuenamusega aladele kvartalites JS224, JS272 ja JS287. Varem asusid nimetatud alal professor Andres Mathieseni eest-

vedamisel rajatud puistu kasvukäigu püsi-proovialad (Siim & Kangur, 2013). Enne raiet kasvas kvartalil JS224 jänesekapsa kasvukohatüübi kase-haava puistu, kvartalil JS272 jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübi kahel proovialal männi-kuuse ja ühel proovialal kuuse-kase puistu, kvartalil JS287 jänesekapsa-mustika kasvukohatüübi kuuse-männi-kase puistu. Kvartalil JS272, kus kasvasid uuritud aladel kõige vanemad puud, oli kaks aastat enne proovitükkide rajamist tehtud valgustusraie. Kolmel kvartalil on kokku üheksa kobarprooviala. Iga 250 m² suurune kobarprooviala koosneb viiest neljameetrise raadiusega (50 m²) prooviringist (joonis 1). Kobarproovialade rajamise ja mõõtmise meetodikat on varem kirjeldanud ka Hämäläinen (2007), Kaer (2007) ja Padari *et al.* (2009).

Joonis 1. Iga kobarprooviala koosneb viiest prooviringist, mis oli jagatud neljaks sektoriks.

Figure 1. Each study plot consisted of five subplots. Each subplot was divided into four quadrants.

Esimest korda mõõdeti proovialad 2005. aasta suvel, kordusmõõtmisi on tehtud olenevalt proovialast neljal kuni kuuel korral, sügisel vegetatsiooniperioodi lõpus või kevadel enne kasvuperioodi algust. Esimesel kolmel aastal mõõdeti proovialadel puid, mille kõrgus (h) vastasid tingimusele $h \geq 0,8$ m, alates 2008. aastast on

mõõdetud kõigi proovialadel kasvavate puude kõrgused. Analüüsis kasutati kahe mõõtmismetoodika ühisosa $h \geq 0,8$ m andmeid. Proovialadel on mõõdetud puude kõrgus ja määratud liik, rinne ja asukoht kobarproovialal. Siinses töös analüüsiti uuenduse puude andmeid, proovialadel kasvavad eelmise metsapõlvkonna puud (seemne- ja säilikuud) jäeti analüüsist välja. Proovialadel leidub enam kui 14 erinevat puu- ja põõsaliiki, enim esineb kaski, kuuski ja haabasid. Neljal esimesel mõõtmisaastal (tabel 1) lisandus iga-aastaselt uusi puid, mis olid saavutanud mõõtmiskõrguse $h \geq 0,8$ m (v.a M7). See on looduslikult uuenenud noorendikus oodatud tulemus, kuna uuendusraie järel valitsevad puistutes uute puude kasvama minekuks soodsad tingimused (seemnepuude olemasolu, head valgustingimused ja vähene

konkurents). Puude arvu järsud langused 2008. ja 2010. aasta võrdluses proovialadel M2, M3, M7 ja M8 olid tingitud 2010. aasta talve lumevaalimisest, mille tagajärjel hukkusid eelkõige nooremad puud. Kahe viimase mõõtmiskorra tulemustest on näha, et kaheksast proovialast seitsmel on uusi puid märkimisväärselt lisandunud. Joonisel 2 on esitatud proovitükkide kaupa puude kõrgusandmed mõõtmisaastate lõikes.

Kõrgusjaotuste lähendamine Weibulli funktsiooniga

Siinses töös kasutati noorendike puude järjestikuste mõõtmisaastate kõrgusjaotuste kirjeldamiseks kaheparameetrilist, kuju- ja mastaabiparameetrit sisaldavat Weibulli funktsiooni, mis pole küll nii paindlik kui kolme parameetrline funktsioon, kuid mis on

Tabel 1. Proovialade lühiseloomustus.

Table 1. Short description of study plots.

Kvartal Forest compartment	Prooviala (250 m ²) Plot ID (250 m ²)	Koordinaadid, x; y Coordinates, x; y	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2012
			Puude arv*, tk / Number of trees*, n						
JS224	M1	6465027; 694257	390	473	583	671	-	568	615
	M2	6465015; 694201	469	538	678	797	-	611	690
	M3	6464969; 694269	423	449	639	793	-	553	653
	M4	6464912; 694278	127	139	216	241	232	229	274
	M5	6464851; 694289	94	145	225	289	305	299	401
JS272	M6	6462833; 693845	241	273	392	529	-	458	629
	M7	6462794; 693858	445	438	513	677	-	383	-
	M8	6462746; 693893	167	233	759	1040	-	382	499
JS287	M9	6462506; 694173	105	120	151	139	142	139	147

* $h \geq 0,8$ m

Joonis 2. Proovialade puude kõrgusandmete kirjeldus (ilma erinditeta).

Figure 2. Description of tree height data in each study plot (outliers excluded).

andnud viimasest paremini tõlgendatavaid tulemusi (Maltamo *et al.*, 1995). Andmetöötlus tehti andmeanalüüsipaketiga R (*R Core Team*, 2014). Analüüsitavad objektid olid puuliikide alamandmestiku, millest moodustati kõrgusjaotused, analüüsi tehti proovialade ja mõõtmisaastate kaupa.

Empiirilise kõrgusjaotuse kooskõla teoreetilise jaotusega testiti Pearsoni χ^2 -testiga. χ^2 -testi kasutamise tingimuseks on andmete rühmitamine klassidesse, seejuures on oluline, et kogutud valimi maht alam-

andmestikus oleks piisav ja teoreetilised klasside sagedused (ehk oodatavad sagedused) ei oleks liiga väikesed. Väiksema kui 40 vaatlusega alamandmestiku analüüsis ei tohi teoreetiliste klasside sageduste arv langeda alla nelja. Kui vabadusastmete arv on suurem kaheksast või sellega võrdne ja uuritavas üldkogumis on väärtusi vähemalt 40, võib teoreetiliste sageduste klassis olla väärtuste arv minimaalselt üks, vastasel korral tuleb liiga väikse sagedusega klassid ühendada (Sachs, 1982).

Igal mõõtmisaastal on seega oluline, et proovitükil oleks konkreetse liigi puude arv ≥ 40 , et täita χ^2 -testi nõudeid. Teise tingimusena pidi puuliigi puude koguarv olema kordusmõõtmiste perioodil > 300 , et oleks võimalik analüüsida jaotuste dünaamikat ajas.

Toodud kriteeriumitele vastanud alamandmestikele arvutati kõrgust kirjeldavad statistikud $h_{\min}$, $h_{\max}$, $\bar{h}$, h_{ruut} , h_{Me} , $h_{\max} - h_{\min}$ ning leiti Weibulli jaotuse kuju- ja mastaabiparameetrite hinnangud suurima tõepära meetodil paketi MASS *fitdistr*-funktsiooniga. Analüüsiti Weibulli jaotuse parameetrite ja puistu kõrgust kirjeldavate statistikute vahelist lineaarset korrelatsiooni. Lineaarne seos hinnati tugevaks, kui Pearsoni korrelatsioonikordaja oli $\geq 0,7$. Lisaks võrreldi parameetrite dünaamikat puuliigiti proovialade kaupa järjestikustel mõõtmisaastatel uurimisperioodi vältel.

Empiirilistel alamandmestikel moodustati kõrgusjaotused kolmel meetodil. Jaotusklasside moodustamiseks rühmitati kõrgused viide ja kümnesse klassi (igas klassis arvestuslikult võrdne arv vaatlusi) ning ühemeetrise intervalliga klassidesse (igas klassis erinev arv kõrgusmõõtmisi). Iga meetodi jaoks hinnati empiirilise ja Weibulli jaotuse kooskõla χ^2 -testiga. Seejärel analüüsiti testi olulisuse tõenäosuse lineaarset korrelatsiooni Weibulli kuju- ja mastaabiparameetrist.

Tulemused ja arutelu

Kõrgusjaotuste analüüsi kriteeriumitele vastas 108 alamandmestikku, neist 48 oli kaskede, 24 kuuskede, 18 haabade, 12 pärnade ja 6 pihlakate kõrgusandmestikud. Igal alamandmestikul analüüsiti suurima tõepära meetodil leitud Weibulli jaotuse kuju- ja mastaabiparameetri dünaamikat puuliigiti mõõtmisaastate ulatuses. Teatavasti on Weibulli jaotus kujuparameetri väärtuse 3,6 juures normaaljaotusele lähedane. Kujuparameeter jäi 90,7%-l uuritud alamandmestikest alla 3,6, mis

viitab jaotuste positiivsele asümmeetriale. Positiivne asümmeetria on noorendike puude kõrgusjaotuste korral ootuspärane, sest jõudsama kasvuga puud eristuvad ülejäänutest. Kujuparameetrite väärtused ajalisel järgnevuses olid langeva tendiga, näidates asümmeetria süvenemist uurimisperioodi kestel.

Esialgu tugevusõpetuse rakenduseks loodud Weibulli jaotust on metsanduslikus modelleerimises kasutatud seni peamiselt puude rinnasläbimõõdu jaotuse lähendamisel nii Eestis (Gulov, 2010) kui ka mujal maailmas (Siipilehto, 1999; Zhang & Liu, 2006; Diamantopoulou *et al.*, 2015). Weibulli jaotus on andnud häid tulemusi ka noorendike puude kõrgusjaotuste lähendamisel (Westfall *et al.*, 2004; Eerikäinen *et al.*, 2007; Siipilehto, 2009).

Siipilehto (2009) on Weibulli jaotuse parameetrite hinnanguid rakendanud puistu struktuuri modelleerimise sisendina, kasutades hariliku männi enamusega noorendike kordusmõõtmiste kõrgusandmeid. Proovialad asusid nii loodusliku uuenduse kui ka külvi- ja istutuse aladel. Puude kõrgused olid uuritud andmestikus vahemikus 0,2–17,0 m. Siipilehtol jäid kujuparameetri hinnangud vahemikku 0,9–20,7. Keskmise kujuparameetri väärtuse 4,2 alusel olid jaotused negatiivse asümmeetriaga, iseloomustades külvi ja istutuse omapära, kus eristuvad kasvus alla jäänud puud. Meie andmestiku kujuparameetri väärtused olid vahemikus 1,2–4,3 (keskmine 2,4), kirjeldades loodusliku uuenduse arengut, kus igal aastal lisandub proovi- alale uusi puid. Seetõttu on suurem osa kõrgusi väiksemad mediaanist, mis näitab jaotuse positiivset asümmeetriat.

Weibulli jaotuse mastaabiparameeter kirjeldab puude kõrguse varieeruvuse ulatust. Mastaabiparameetri keskmine väärtus meie andmestikus oli 3,2 (1,3–11,5), Siipilehto (2009) uurimuse vastav näitaja oli 4,7 (0,2–15,7). Mastaabiparameetri lähedased tulemused on tingitud kasutatud kõrgusandmestike sarnastest ulatustest. Analüüsitud kõrguste andmestikel oli

Joonis 3. Weibulli jaotuse mastaabiparameetri dünaamika proovialadel.

Figure 3. The dynamics of the Weibull distribution scale parameter in each study plot.

parameetri väärtus vanuse kasvades tõus-va trendiga (joonis 3), iseloomustades noorendike kõrguskasvu muutumist väga selgelt – noorendike kõrguse jaotuste haare on algaastatel väike, kuid suureneb järgnevate aastatega. Mastaabiparameetrite dünaamika oli puuliikide võrdluses samadel proovialadel sarnase trendiga.

Korrelatsioonanalüüs (tabel 2) näitas kujuparameetri negatiivset korrelatsiooni andmestiku maksimaalse kõrguse ja kõrguste haardega ($h_{\max} - h_{\min}$). Mastaabi-

parameeter oli tugevas positiivses korrelatsioonis kõigi puuliikide korral keskmise ja ruutkeskmise kõrguse ning mediaankõrgusega, sarnaste sõltuvuste esinemist kinnitas ka Siipilehto (2009). Mastaabiparameetri tugev positiivne seos ruutkeskmisega on leidnud kinnitust ka rinnasläbimõõdu jaotuse korral (Gulov, 2010).

Iga andmestiku kohta moodustati kolm kõrgusjaotust. Empiirilise ja Weibulli jaotuse kooskõla hindamisel χ^2 -testiga näitas kolmest jaotuse moodustamise meetodist

Tabel 2. Weibulli jaotuse parameetrite ja empiiriliste kõrgusjaotuste tunnuste korrelatsioonid.
 Table 2. Correlation between Weibull distribution parameters and characteristics of empirical height distributions.

Para-meeter	Puuliik	Korrelatsioonikordaja / Correlation coefficient					
Para-meter	Tree species	$h_{\min}$	$h_{\max}$	$h_{\max} - h_{\min}$	h_{Me}	$\bar{h}$	$\bar{h}_{\text{ruut}}$
Kujuparameeter Shape parameter	Kõik / All sp.	0,09	-0,71***	-0,72***	-0,05	-0,25**	-0,35***
	Haab / Aspen	-0,08	-0,74***	-0,76***	-0,34	-0,36	-0,4
	Kask / Birch sp.	0,09	-0,71***	-0,72***	-0,06	-0,24	-0,33*
	Kuusk / Spruce	-0,07	-0,88***	-0,88***	-0,56**	-0,72***	-0,76***
	Pihlakas / Rowan	-0,38	-0,95**	-0,95**	-0,87*	-0,89*	-0,91*
	Pärn / Linden	-0,16	-0,8**	-0,81	-0,46**	-0,59*	-0,66*
Mastaabiparameeter Scale parameter	Kõik / All sp.	0,58***	0,73***	0,72***	0,96***	1,00***	0,99***
	Haab / Aspen	0,74***	0,56*	0,53*	1,00***	1,00***	1,00***
	Kask / Birch sp.	0,72***	0,76***	0,75***	0,97***	1,00***	0,99***
	Kuusk / Spruce	0,33	0,95***	0,94***	0,96***	1,00***	1,00***
	Pihlakas / Rowan	0,36	0,94**	0,94**	0,97**	1,00***	1,00***
	Pärn / Linden	0,74**	0,84***	0,82**	0,97**	1,00***	0,99***

* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

Märkused / Notes:

$h_{\min}$ – Miinimumkõrgus / Minimum height

$h_{\max}$ – Maksimumkõrgus / Maximum height

$h_{\max} - h_{\min}$ – Kõrguste haare / Range of the heights

h_{Me} – Mediaankõrgus / Median height

$\bar{h}$ – Keskmine kõrgus / Mean height

$\bar{h}_{\text{ruut}}$ – Ruutkeskmine kõrgus / Quadratic mean height

parimat ühtivust teoreetilise jaotusega viie klassi meetod, mille puhul oli 39,8% jaotustel testi olulisuse tõenäosus $\geq 0,05$. Kümne klassi meetodi korral oli vastav näitaja 34,3% ja ühemeetrise intervalliga klasside ehk traditsioonilise meetodi korral 24,1%.

Pooled analüüsitud empiirilistest andmetest ei sobinud Weibulli jaotusega ühegi kasutatud klasside moodustamise meetodi korral. Statistiliselt mitesobinud jaotuste visuaalsel hindamisel olid empiiriliste ja teoreetiliste jaotuste üldkujud enamikul juhtudel siiski üsna sarnased, mistõttu saab Weibulli jaotust pidada noorendike kõrgusjaotuste lähendamisel üsna sobivaks. Joonisel 4 on esitatud proovitüki M1 kaskede kõrgusjaotused koos Weibulli jaotustega aastatel 2006, 2008 ja 2012. χ^2 -testi

olulisuse tõenäosuse (p) alusel erineb 2006. aasta kaskede jaotus teoreetilisest jaotusest ($p = 0$), kuid graafiliselt jaotuste erinevus ei kajastu.

Väikeste kõrgustega ($h < 3$ m) puude puhul oli viie klassi meetodi eeliseks traditsioonilise meetodiga võrreldes piisava klasside arvu olemasolu sõltumata puude kõrguste väiksest ulatusest. Traditsiooniliste klasside puhul oli kuni kolmemeetrise puude jaotuste korral testi olulisuse tõenäosus alati $p < 0,05$, kuid viie klassi meetodi korral oli 66%-l jaotustest vastav näitaja $p \geq 0,05$. Kui jaotuse puude kõrguste haare oli > 10 m, polnud viie klassi meetodil eelist traditsioonilise meetodiga võrreldes (sobisid vastavalt 26,7% ja 33,3%). Viie klassi meetodi korral pole küll probleemiks väärtuste

Joonis 4. Empiirilise ja Weibulli jaotuse sobimine proovitüki M1 kaskede näitel.

Figure 4. Fit of the empirical and Weibull distribution on the example of birch in study plot M1.

vähesus klassis, nagu on seda tihti traditsiooniliste klassidega jaotuste korral, kuid χ^2 -testi tulemuse alusel ei andnud see eelist teoreetilisele jaotusele vastavuse osas.

χ^2 -testi tulemuste Weibulli jaotuse kuju- ja mastaabiparameetri korrelatsioonid on esitatud tabelis 3. Puuliigiüleseid trende kahe väärtuse sõltuvuses ei esinenud ning korrelatsioonid olid tihti statistiliselt ebaolulised.

Tulemuslikuks metsa majandamiseks on vaja teada puistute looduslikku arengudünaamikat ja selle muutmise mõjusid kogu puistu eluea vältel. Puistu kõrguse modelleerimisel kasutatakse sageli ühe sisendina puude rinnasläbimõõtu (Kangur *et al.*, 2007). Noore puistu puhul, kus kõik puud pole veel rinnaskõrgust saavutanud, tuleb sisendina kasutada aga teistsuguseid tunnuseid. Kõrgusjaotuste muutumine ajas annab puistu puude kasvust ülevaatliskuma hinnangu kui keskmise kõrguse muutus. Jaotuse prognoosimisel on vaja teada empiiriliste kõrgusandmete eeldatavat jaotust. Noorendike puude kõrgusjaotuste kirjeldamisel on kasutatud teoreetilist Weibulli jaotust (Westfall *et al.*, 2004; Eerikäinen *et al.*, 2007; Siipilehto, 2009),

mille parameetrid kirjeldavad jaotuse kuju ja mastaapi. Noore puistu kasvu modelleerimisel saab Weibulli jaotuse parameetrite hinnanguid kasutada prognoosimodeli esmaste sisenditena teiste näitajate (vanus, puude arv, puuliik, kasvukoht jm) korral.

Kokkuvõte

Empiiriliste kõrgusjaotuste lähendamiseks kasutatud Weibulli jaotus polnud statistiliste hinnangute poolt enamikul juhtudel noorendike jaotusi kirjeldav, samas olid paljude uuritud empiiriliste ja teoreetiliste jaotuste üldkujud sarnased. Jaotuste sarnasus kinnitab teoreetilise jaotuse sobimist kõrgusjaotuste kirjeldamiseks. Kõrgusjaotuste moodustamisel kasutatud kolmest erinevast meetodist andis Weibulli jaotusega lähendamisel parima tulemuse viie klassiga jaotus (39,8%), mille eelis teiste (kümne klassiga jaotus (34%) ja ühemeetrise intervalliga jaotuse (24,1%) ees oli piisav klasside arv ning klassi kuuluvate sageduste hulk erinevate andmestike korral. Weibulli jaotuse kujuparameeter oli negatiivses korrelatsioonis puistute

Tabel 3. χ^2 -testi olulisuse tõenäosuse ja Weibulli jaotuse parameetrite korrelatsioonid.Table 3. Correlations between χ^2 -test p-value and parameters of the Weibull distribution.

Puuliik	Traditsiooniline jaotus		10 klassiga jaotus		5 klassiga jaotus	
Tree species	Traditional distribution		Distribution with 10 classes		Distribution with 5 classes	
	Shape	Scale	Shape	Scale	Shape	Scale
Koos / All sp.	0,10	0,09	0,35***	-0,09	0,28**	-0,09
Haab / Aspen	0,51*	-0,30	0,44	-0,47*	0,53*	-0,37
Kask / Birch sp.	0,11	0,07	0,28*	-0,05	0,44**	-0,25*
Kuusk / Spruce	-0,26	0,58**	0,11	0,17	-0,15	0,54**
Pihlakas / Rowan	-0,55	0,56	0,33	-0,25	0,06	-0,12
Pärn / Linden	-0,07	0,71**	-0,04	0,69*	0,71**	-0,20

* – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$; *** – $p < 0,001$

Märkused / Notes:

Shape – Kujuparameeter / Shape parameter

Scale – Mastaabiparameeter / Scale parameter

maksimaalse kõrguse ja kõrguste haardega ($h_{\max} - h_{\min}$). Noorendike kõrgusjaotused olid vaatlusperioodi kestel süveneva positiivse asümmeetriaga. Mastaabiparameeter oli tugevas positiivses korrelatsioonis kõigi puuliikide korral keskmise ja ruutkeskmise kõrgusega ning mediaankõrgusega.

Tänuavaldused. Püskatsealade mõõtmisi on toetanud Keskkonnainvesteeringute Keskus ning Järvselja Õppe- ja Katsemetsakond. Uurimistööd toetasid Euroopa Liidu Regionaalarengu Fond (EU Regional Development Foundation, Environmental Conservation and Environmental Technology R&D Program project BioAtmos (3.2.0802.11-0043) ja Eesti Teadusagentuur (Institutsionaalne Uurimistoetus, projekt IUT21-04).

Kasutatud kirjandus

- Aastaraamat Mets 2013. (Yearbook Forest 2013). 2014. Keskkonnaagentuur. (Environmental Agency). Tartu. 244 pp. (In Estonian).
- Diamantopoulou, M.J., Özçelik, R., Crecente-Campoc, F., Elerb, Ü. 2015. Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods. – Biosystems Engineering, 133, 33–45.
- Eerikäinen, K., Miina, J., Valkonen, S. 2007. Models for the regeneration establishment and the develop-

ment of established seedlings in uneven-aged, Norway spruce dominated forest stands of southern Finland. – Forest Ecology and Management, 242, 444–461.

Eesti metsad 2010. 2012. (Estonian forests 2010). Keskkonnateabe Keskus, Tallinn. 159 pp.

Eesti metsanduse arengukava aastani 2020. (Estonian forestry development plan until 2020). 2010. Keskkonnaministeerium, Tallinn. 39 pp. (In Estonian).

Franklin, J.F., Spies, T.A., Van Pelt, R., Carey, A.B., Thornburgh, D.A., Berg, D.R., Lindenmayer, D.B., Harmon, M.E., Keeton, W.S., Shaw, D.C., Bible, K., Chen, J. 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. – Forest Ecology and Management, 155, 399–423.

Gulov, I. 2010. Modelling tree diameter distribution with Weibull function on the data of Estonian network of forest growth permanent plots. (Puude rinnasdiameetri jaotuse modelleerimine Weibulli funktsiooniga puistu kasvukäigu püsiproovitükide andmestikul). MSc thesis. Tartu, Estonian University of Life Sciences. 65 pp. (In Estonian with English summary).

Hämäläinen, M. 2007. Calculation of single tree volume in young stands. (Üksikpuude mahu arvutamine noorendikes). MSc Thesis. Tartu, Estonian University of Life Sciences. 41 pp. (In Estonian with English summary).

Kaer, R. 2007. Calculating stand top height in young stands. (Puistu keskmise kõrguse arvutamine noorendikes). MSc Thesis. Tartu, Estonian University of Life Sciences. 68 pp. (In Estonian with English summary).

Kangur, A., Sims, A., Jõgiste, K., Kiviste, A., Korjus, H., Gadow, K.v. 2007. Comparative modeling of

- stand development in Scots pine dominated forests in Estonia. – *Forest Ecology and Management*, 250, 109–118.
- Kängsepp, V. 2011. Height distribution analysis of young naturally regenerated forests on the data of Järvselja permanent plots. (Looduslikult uuenenud noorendike puude kõrguste jaotuste analüüs Järvselja püsikatealade andmetel). BSc Thesis. Tartu, Estonian University of Life Sciences 44 pp. (In Estonian with English summary).
- Maltamo, M. Puumalainen, J., Päivinen, R. 1995. Comparing of Beta and Weibull Functions for modeling Basal Area Diameter Distribution in Stands of *Pinus sylvestris* and *Picea abies*. – *Scandinavian Journal for Forest Research*, 10, 284–295.
- Mathiesen, A. 1926. The birch stands in Kastre-Pera-valla. (Kastre-Pera-valla kase puistikkudest). – Tartu Ülikooli metsaosakonna toimetused, 7, 4–44. (In Estonian with German summary).
- Metsa korraldamise juhend. 2009. RTL 2009, 9, 104. eRT [WWW document]. – URL <https://www.riigiteataja.ee/aktiilisa/0000/1312/4148/13124171.pdf>. [Accessed 11 February 2015]. (In Estonian).
- Padari, A., Metslaid, S., Kangur, A., Sims, A., Kiviste, A. 2009. Modelling stand mean height in young naturally regenerated stands – a case study in Järvselja, Estonia. – *Baltic Forestry*, 15(2), 226–236.
- R Core Team. 2014. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. [WWW document]. – URL <http://www.R-project.org/>. [Accessed 11 February 2015].
- Sachs, L. 1982. *Applied Statistics: A Handbook of Techniques*. New York, Springer-Verlag. 706 pp.
- Siim, K., Kangur, A. 2013. Cultural heritage in Järvselja. (Järvselja pärandkultuuri radadel). Tartu, Eesti Loodusfoto. 139 pp. (In Estonian).
- Siipilehto, J. 1999. Improving the accuracy of predicted basal-area diameter distribution in advanced stands by determining stem number. – *Silva Fennica*, 33, 281–301.
- Siipilehto, J. 2009. Modelling stand structure in young Scots pine dominated stands. – *Forest Ecology and Management*, 257, 223–232.
- Zhang, L., Liu, C. 2006. Fitting irregular diameter distributions of forest stands by Weibull, modified Weibull, and mixture Weibull models. – *Journal of Forest Research*, 11, 369–372.
- Tullus, H., Reisner, Ü. 1998. Permanent plots of thinning effect in Järvselja Training and Experimental Forest Centre. (Hooldusraiete püsikatealad Järvselja Õppe- ja Katsemajandis). – *Järvselja metsades*, 3, 74–90. (In Estonian).
- Westfall, J.A., Burkhart, H.E., Allen H.L. 2004. Young stand growth modeling for intensively-managed loblolly pine plantations in southeastern U.S. – *Forest Science*, 50, 823–835.

Tree height distribution dynamics in young naturally regenerated study plots

Vivika Kängsepp, Ahto Kangur and Andres Kiviste

Summary

In Estonia the share of stands left for natural regeneration is increasing. Today 70% of clear-cut stands left for natural afforestation are regenerating up to 76% with broadleaved species (Eesti metsad..., 2012). During the next twenty years the largest birch generation is going to reach maturity (Eesti metsanduse..., 2010). Still, we do not have a good method for predicting the development of young naturally regenerated broadleaves dominated stands. In Estonia, the growth modelling of young stands is based on tree species abundance and average height estimation (Metsa korraldamise..., 2009) but the average height of the stand fails to describe height variability in young trees.

Forest regeneration study plots (figure 1) were established in 2005 in south-eastern Estonia at Järvselja Training and Experimental Forest Center to study the growth dynamics of young naturally regenerated forests. The study plots were re-measured 4–6 times between the years of 2006 and 2012 (Table 1, Figure 2).

In an earlier study (Kängsepp, 2011) the fit of the height distribution of measured young trees to the plot measurements based on three different theoretical distributions was tested (normal, lognormal and the Weibull distribution) in 2008. The results indicated the best fit with the Weibull distribution and it was selected for this study to test the distribution fit to

consecutive years' tree height distributions. We used the maximum likelihood method to estimate the shape and scale parameters with the R function *fitdistr*. The Weibull distribution fit for height distribution was assessed with the Pearson chi-squared test. We used three methods for grouping tree heights (with one-meter interval classes, with 5 and 10 equal frequency classes) for different tree species.

The distribution with five classes showed the best fit with the Weibull distribution, the Pearson chi-squared test result probability of significance was 0.05 or higher in 39.8% of the cases. Respectively the fit with one-meter interval classes was significant in 24.1% of the pairs and for 10 classes distribution 34.3% of the cases. These results confirm that the method of dividing the data in classes plays an important role in the Pearson test results. Visual analysis of these distributions showed a similarity between the general shapes of the empirical and theoretical distributions (Figure 4).

The changes in the Weibull distribution shape and scale parameter values in

consecutive years were analyzed by tree species in each sample plot. In most of the measurement years and tree species, the shape parameter was less than 3.6 indicating a positive asymmetry within the distributions. The positive asymmetry is expected with the height distribution of young trees because of the annual ingrowth of new trees in early stand development. In a temporal scale the shape parameter has a declining trend, so the positive asymmetry of distribution was growing during the study period. The scale parameter describes the scope of the observed dataset values. The values of the analyzed distributions showed an increasing trend over the study period (Figure 3), describing clearly the young stand peculiarities. The height distributions of young stands always start with very small values, but the difference between the minimum and maximum value increases annually. The shape parameter was related to the maximum height and range of the height. And scale parameter was related to the mean, quadratic mean and median of tree heights (Table 2).

Received September 8, 2015, revised October 12, 2015, accepted December 18, 2015