

Puistute kõrguskasvu muutuse hindamine

Mait Lang^{1,2,*}, Tauri Arumäe², Diana Laarmann² ja Andres Kiviste²

Lang, M., Arumäe, T., Laarmann, D., Kiviste, A. 2017. Estimation of change in forest height growth. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 67, 5–16. ISSN 1406-9954. Journal homepage: <http://mi.emu.ee/forestry.studies>

Abstract. Forest height increment rate is related to the forest growth conditions. Databases of previous forest inventories contain information about forest height-age relationship on large number of forest stands while repeated measurements of permanent sample plots provide an excellent reference for comparison. Repeated airborne laser scanning of forest stands is an additional source for the estimation of change in forest structure. In this study, height growth of middle-aged and older forest stands for about 10 year period was compared to an algebraic difference model on permanent sample plots (66) and for a sample of forest stands with repeated airborne laser scanning data (61). The model was based on a large dataset of forest inventory records from the period of 1984–1993. Statistically significant increased forest height growth was found in permanent sample plots based on tree height measurements (9 cm yr^{-1}) as well in stands with repeated laser scanning data (4.5 cm yr^{-1}) in South-East Estonia compared to the algebraic difference model. The difference between the two data sets was explained by their mean age and site class, but the increased forest height growth compared to the old forest inventory data indicates improved growth conditions of forests in the test area. The results hint also that empirical data-based forest growth models need to be updated to avoid biased growth estimates.

Key words: laser scanning, change detection, permanent sample plots, historical forest data, forest growth models.

Authors' addresses: ¹Tartu Observatory, 61602 Tõravere, Tartu County, Estonia; ²Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, Estonia; *e-mail: mait.lang@to.ee

Sissejuhatus

Metsamajanduslike otsuste kavandamine põhineb andmetel ja mudelitel. Metsa kasvu seaduspärasusi kirjeldavate mudelite aluseks olevad mõõtmisandmed jätavad neisse mudelitesse oma jälje. Kui puistute kasvu mõjutavad keskkonnatingimused muutuvad, siis võib varasemate empiiriliste vaatlusandmete põhjal lähendatud mudeli parameetreid kasutades saada süstemaatilise veaga hinnangu (Kiviste, 1999).

Esimene avaldus metsa kasvu kiirenemisest Eestis ilmnes metsakorralduse takseerikirjelduste andmeil kasvukohatüübi koostatud kõrguse vanuseridade võrdlemise tulemusel (Nilson & Kiviste, 1984). Samal

aastal avaldati hüpotees metsa kasvu kiirenemisest ka Soome reservaatmetsadest võetud puursüdame analüüsi põhjal (Hari *et al.*, 1984). Järgneva aastakümne jooksul avaldati mitmeid uurimusi muutustest metsa kasvus erinevates Euroopa maades (Spiecker *et al.*, 1996). Eestis võrreldi sõjajärgse (1950-ndate) ja 1990-ndate metsakorralduste andmeid puistute kaupa, millest selgus, et kõrgusindeks H_{50} oli 40-aastase perioodi jooksul suurenenud sõltuvalt puuliigist ja kasvukohast 2–3 meetrit (Kiviste, 1999). Lisaks metsakorralduse andmetele on puude kõrguskasvu muutust uuritud ka samas kasvukohas erineva vanusega puude kõrguse kasvukäikude võrdlemise teel (Metslaid *et al.*, 2011). Kuigi metsa kasvu kiirenemise kohta viimastel

aastakümnetel on avaldatud arvestataval hulgal tõendeid, ei ole uurijate hulgas ühist seisukohta selle põhjuste osas: metsa kasvu kiirenemise põhjuseks on peetud süsihappegaasi kontsentratsiooni suurenemist atmosfääris, õhusaastest tingitud metsamulla viljakuse suurenemist, metsakuivenduse pikaajalist mõju, aga ka intensiivset metsamajandamist (hooldusraied, metsaselektatsioon) (Nilson *et al.*, 1999). Puistu kõrguse kasv võib olla ka negatiivne, kui puude suremusest tingituna puistu laguneb või hoopis hävib tulekahju või tormi tõttu täielikult, mis on näiteks ürgmetsades häiringurežiimi normaalne osa (Mathiesen, 1940).

Puude kõrguste mõõtmiseks ja puistu kõrguse hindamiseks on järjest rohkem kasutusele võetud lennukitelt tehtav laserskaneerimine (lidarmöödistus). Yu *et al.* (2006) kasutasid suure punktitiheidusega skaneerimise andmeid üksikpuude kõrguskasvude mõõtmiseks ja leidsid, et peegelduste kõrgusjaotuste ülemised protsentiilid sobisid selleks hästi. Rutiinse topograafilise kaardistamise jaoks valitakse tavaliselt selline lennukõrgus ja skanneri seadistus, mille korral laserimpulss valgustab maapinna lähedal umbes 0,5 m lähimõõduga ala. Skanner registreerib kohad, kus laserkiire tagasipeegeldumine on kõige tugevam ja nii tekib kolmemõõtmeline punkt pilv, milles kajastub nii maapind kui ka seda kattev laserimpulsi jaoks üldiselt poolläbilaskev puistu võrastiku struktuur. Peegelduste kõrgusjaotuse määrab peamiselt taimkatte lehepinnaindeks (Magnussen & Boudewyn, 1998). Korduvalt sama puistut mõõtes saame hinnata võrastikus toimunud muutusi.

Käesolevas uuringus võrreldi puistu kõrguse diferentsmudeliga (Kiviste, 1997) prognoositud kõrguse kasvu 1) Järvelja puistute korduva lidarmöödistuse põhjal saadud kõrguse kasvuga ja 2) metsa kasvukäigu püsiproovitudükidel (Kiviste *et al.*, 2015) tehtud mõõtmistega. Eesmärgiks oli selgitada, kas puistute kõrguse kasv praegu ja ajavahemikul 1984–1993 on sarnane või on võimalik tuvastada süstemaatilisi erinevusi kasvu kiiruses.

Materjal and meetodika

Järvelja katseala metsaeraldiste andmed

Esimene vaatlusandmestik (tabel 1) puistute kõrguse kohta võeti Järvelja metsakorralduse andmebaasist. Järvelja puistute andmed on saadud tavalise lausmetsakorralduse meetodiga (Metsakorralduse, 2017). Metsa takseerimisel puistud piiritletakse, hinnatakse puistu koosseis ja mõõdetakse puistuelementide rinnaspindala. Puistuelementide kõrguse hindamiseks kasutatakse välitöödel üksikpuude mõõtmisandmeid. Puistuelemendi kõrguseks takseerandmetes on rinnaspindala järgi keskmise puu kõrgus (Lorey kõrgus, vt. Krigul, 1972). Takseerandmetes on ka eraldisele määratud kasvukohatüübi kood ja puistu vanus. Käesolevas uuringus kasutati 2011. aastal välja antud metsakorralduse andmebaasi.

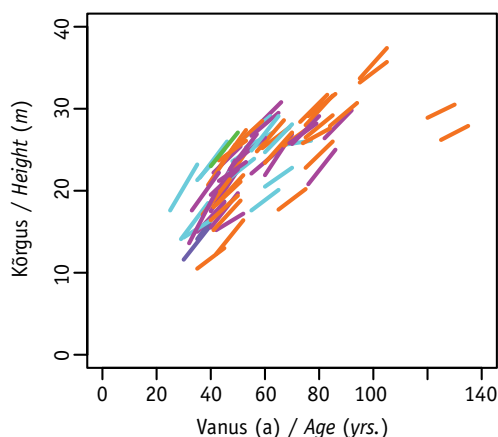
Tabel 1. Järveljal mõõdetud puistute üldiseloomustus (puuliikide koodide selgitused on lisa 1).

Table 1. General characteristics of Järvelja forest stands used in this study. Smaller site class values indicate fertile soils. Species codes are given in the Appendix 1.

Peapuuliik Main species	Boniteediklass Site class	Puistu vanus Stand age		Arv Count
		Minim	Maxim	
HB	0	70	85	2
KS	0	50	100	3
KU	0	26	61	4
MA	0	75	75	1
KS	1	16	90	15
KU	1	34	78	6
LM	1	30	33	3
MA	1	115	115	1
KS	2	10	45	6
KU	2	37	200	3
MA	2	70	70	1
PN	2	90	105	2
KS	3	125	125	1
KU	3	125	125	1
LM	3	10	150	2
MA	3	115	115	1
KS	4	25	25	1
MA	4	130	190	5
MA	5	120	145	3

Metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustiku kordusmõõtmise andmed

Teine puistute kõrguse kasvu empiiriline andmestik pärines Eestit katva metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustiku (Kiviste *et al.*, 2015) andmebaasist. Analüüsimiseks võeti Järveljast kuni 50 km kaugusel asuvate proovitükkide kaks 10-aastase vahega tehtud kordusmõõtmist, mille viimane mõõtmine oli aastail 2012–2016 (joonis 1). Neile tingimustele vastavaid mõõtmispaare ehk proovitükke oli 66, mille esimese mõõtmise üldandmed on esitatud tabelis 2. Nende puistute keskmine boniteet on 1,0. Neist 15 proovitükil oli kahe kordusmõõtmise vahel toimunud harvendusraie, mille käigus oli vähemalt 20% puudest välja raiutud. Puistu kõrguseks võeti esimese rinde puuliikide kõrguste rinnaspindala järgi kaalutud keskmine kõrgus.



Joonis 1. Puistu I rinde keskmise kõrguse muutumine kümne aasta jooksul püsiproovitükkide kordusmõõtmiste andmeil. Värvid peapuuliikidele on vastavalt metsakorralduse juhendile.

Figure 1. Stand height growth of first layer during 10 years measured in the sample plots of the Estonian Network of Forest Research. Line colours correspond to dominating tree species.

Tabel 2. Metsa kasvukäigu proovitükkide võrgustiku puistute valimi üldiseloostus (puuliikide koodide selgitused on lisas 1).

Table 2. General characteristics of sample plots of the Estonian Network of Forest Research Plots used in this study. Smaller site class values indicate fertile soils. Species codes are given in appendix 1.

Peapuuliik Main species	Boniteedi- klass Site class	Puistu vanus Stand age		Arv Count
		Mini- mum	Maxi- mum	
HB	0	40	40	1
KS	0	25	53	5
KS	1	29	67	8
KS	2	60	60	1
KS	3	55	55	1
KU	0	33	56	8
KU	1	32	82	9
KU	2	40	76	3
LM	2	35	35	1
LM	3	30	30	1
MA	0	39	95	8
MA	1	37	84	13
MA	2	41	125	4
MA	3	35	65	3

Puistute kõrguse kasvu hindamine lidar-mõõdistuse andmete põhjal SA Järvelja Õppe- ja katsemetskonna alal

Käesolevas katses kasutatakse kahe tavalisest suurema punktihedusega lidar-mõõdistuse andmeid. Lasermõõtmised tegi Eesti Maa-amet 30. juulil 2009 skanneriga Leica ALS50-II ja 16. juunil 2017 skanneriga Riegl VQ-1560i (Riegl, 2017). Mõlemal aastal kasutas Eesti Maa-amet kõrguste esitamiseks Kroonlinna nullpunkti. Mõlemad skannerid töötavad spektri lähiinfra-punases osas 1064 nm lainepikkuse juures. Laserkiire hajumisnurk on $1/e^2$ energia kriiteeriumi järgi skanneril Leica ALS50-II 0,22 milliradiaani ja skanneril Riegl VQ-1560i $\leq 0,25$ milliradiaani. Mõõtmiste põhieesmärgiks oli saada andmestik kolme Järveljal asuva rahvusvahelise kiirguslevimudelite võrdluskatses kasutatud puistu kohta (Kuusk *et al.*, 2013), aga skaneeritud alale jäi ka teisi puistuid. Skannerite seadistu-

sest ja lennukõrgusest (500 m ja 300 m) tulenevalt oli keskmine punktitiheus 2009. aastal 23,7 p m⁻² ja 161,3 p m⁻² 2017. aastal. Skaneerimisnurk ulatus 30 kraadini ja ühe impulsiga valgustatud ala läbimõõt (hetkevaateväli) oli maapinnal 2009. aastal 10–11 cm ja veidi üle 7 cm 2017. aastal.

Lasermõõdistuse andmetest lõigati iga puistu piiride järgi välja tükid. Puistutes, kus 2009. aastal ja 2017. aastal oli skaneeritud erineva suurusega ala, võeti peegeldused mõlema aasta mõõdistuse ühiselt alalt. Andmetöötluseks kasutati LASTools (Isenburg, 2017) ja FUSION (McGaughey, 2016) vahendeid. Servade mõju vähendamiseks jäeti peegelduste andmetest välja 10 m laiune puhverala puistute piiride lähedalt. Kahe mõõtmise ühisel alal leidis 61 üle 10-aastast puistut, kus oli vähemalt 0,1 ha suurune ala mõõdetud ja kahe laserskaneerimise vahelisel ajal polnud toimunud raieid ning puistu kõrgus eraldise siseselt oluliselt ei varieerunud. Nende puistute keskmine boniteediklass on 1,8.

Laserskaneerimise puhul mõõdetakse puistu kõrgust maapinna suhtes. Laserimpulsi peegelduste andmete kasutamisel kanduvad maapinna kõrguse vead seega edasi ka puistu kõrguse andmetesse. Maapinna kirjeldamiseks saab konstrueerida digitaalse kõrgusmudeli, aga kuna Järvelja puistutes on reljeefi muutused väikesed

ja analüüsimiseks kasutati puistu ala kohta keskmistatud pilvemeetrikuid, siis uuriti peegelduste kõrgusjaotuse alumiste protsentiilide (H_{P01} ja H_{P05}) sobivust maapinna kõrguse hindamiseks. Eristades ainult esimesed või kõik peegeldused kaheks vaatlusandmestikuks saadi 2009. ja 2017. aasta lasermõõdistuse põhjal, et 2017. aastal on peegelduste kõrgusjaotuste maapinnalähedased protsentiilid keskmiselt 7–9 cm kõrgemal (tabel 3). Esimeste peegelduste kõrgusjaotuse 5-protsentiilide seos oli nõrgem nelja tiheda puistu tõttu, kus 2009. aastal maapinna lähedalt esimesi peegeldusi ei tekkinud. Puistute kõrguse arvutamiseks valiti maapinna kõrguste jaoks kõikidel peegeldustel põhinev H_{P01_k} , mille konkreetne väärtus määrati iga puistu alalt eraldatud punktivarvest.

Lidarmõõdistuse andmete alusel puistu kõrguse hindamisel tuleb teha nii peegelduste kui ka kõrgusjaotuse protsentiili valik. Üldiselt on osutunud otstarbekaks kasutada puistu kõrguse hindamiseks mõnda peegelduste kõrgusjaotuste ülemistest protsentiilidest (joonis 2). Erinevates skannerites kasutatavad peegelduskoha tuvastamise algoritmid ja erinevad mõõtmistingimused mõjutavad ühe impulsi kohta tekkivate peegelduste arvu ja peegelduste kõrgusjaotust. Näiteks Leica ALS50-II registreerib ühe impulsi kohta peegeldusi

Tabel 3. Peegelduste valik maapinna kõrguse määramiseks Järvelja 2009. ja 2017. aasta lasermõõdistuse andmetest. Statistiliselt mitteolulised parameetrid on kursiivis. S_e on mudeli jääkviga.

Table 3. Selection of point cloud metrics for the ground surface level estimation in Järvelja for years 2009 and 2017 and linear regression model ($y=ax+b$) between observations of the years. S_e is the model residual standard error. Statistically insignificant parameters are in italics.

Punktipilve meetrik / Point cloud metric	Väärtus (m) / Value (m), Aasta / Year		Lineaarseose parameetrid / Linear model parameters			
	2009	2017	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>S_e</i>	<i>R²</i>
H_{P01_k}	33.94	34.03	0.998	0.144	0.08	0.998
H_{P01_1}	34.06	34.14	1.002	-0.006	0.21	0.986
H_{P05_k}	34.22	34.29	1.000	-0.205	0.16	0.993
H_{P05_1}	35.40	34.91	0.518	16.560	1.60	0.467

minimaalselt 3,5 m vahekauguselt (Leica, 2009), kuid Riegl VQ-1560i puhul on see piirang tõenäoliselt oluliselt väiksem (Erkko Grünthal, Eesti Maa-amet, Mustamäe tee 51, Tallinn). Ka ühe impulsi kohta registreeritavate peegelduste arv on skanneril Riegl VQ-1560i suurem võrreldes skanneriga Leica ALS50-II. Kõikidest peegeldustest moodustasid esimesed 2009. aastal 79% ja 2017. aastal 56%, teiste peegelduste osakaal oli vastavalt 19% ja 31%. Kuna esimesest peegeldusest järgmiste registreerimise meetodika oli skanneritel erinev (mida näitas ka teiste peegelduste osakaal), siis võeti puistu kõrguse mõõtmiseks andmestikust ainult laserimpulsi esimesed peegeldused. Puistute kõrguskasvu hindamiseks analüüsiti esimeste peegelduste kõrgusjaotuse 80-, 90-, 95- ja 99-protsentilide väärtusi 2009. ja 2017. aastal. Peegelduste kõrgusjaotuse ülemised protsentilid on osutunud sobivateks tunnusteks Eestis metsa kõrguse hindamisel (Lang *et al.*, 2012).

Puistu kõrguse diferentsimudel

Teise Maailmasõja järgsetel aastatel kasutati Eesti metsanduses puistu kõrguse prognoosimiseks peamiselt Orlovi boniteerimistabeleid. Pärast elektronarvutite kasutuselevõttu metsakorralduses 1970-ndatel aastatel tekkis võimalus takseerkirjelduste massiliseks töötlemiseks regressioonanalüüsi vahendusel (Tappo, 1982), kusjuures rühmitamise aluseks olid ikkagi boniteet ja peapuuliik. Orlovi boniteerimismudeli eeldusest vabanemiseks koostati Eesti riigimetsa 1984–1993.a. andmete põhjal puistute vanuseread kasvukohatüüpide ja peapuuliikide järgi (Kiviste, 1995). Ridade koostamisel kõrvaldati erandid ja edasises analüüsis kasutati vaid puistute andmeid latieast raievanuseni. Koostatud ridu on modelleeritud mitmel meetodil, millest on enim kasutamist leidnud algebraline diferentsimudel kujul

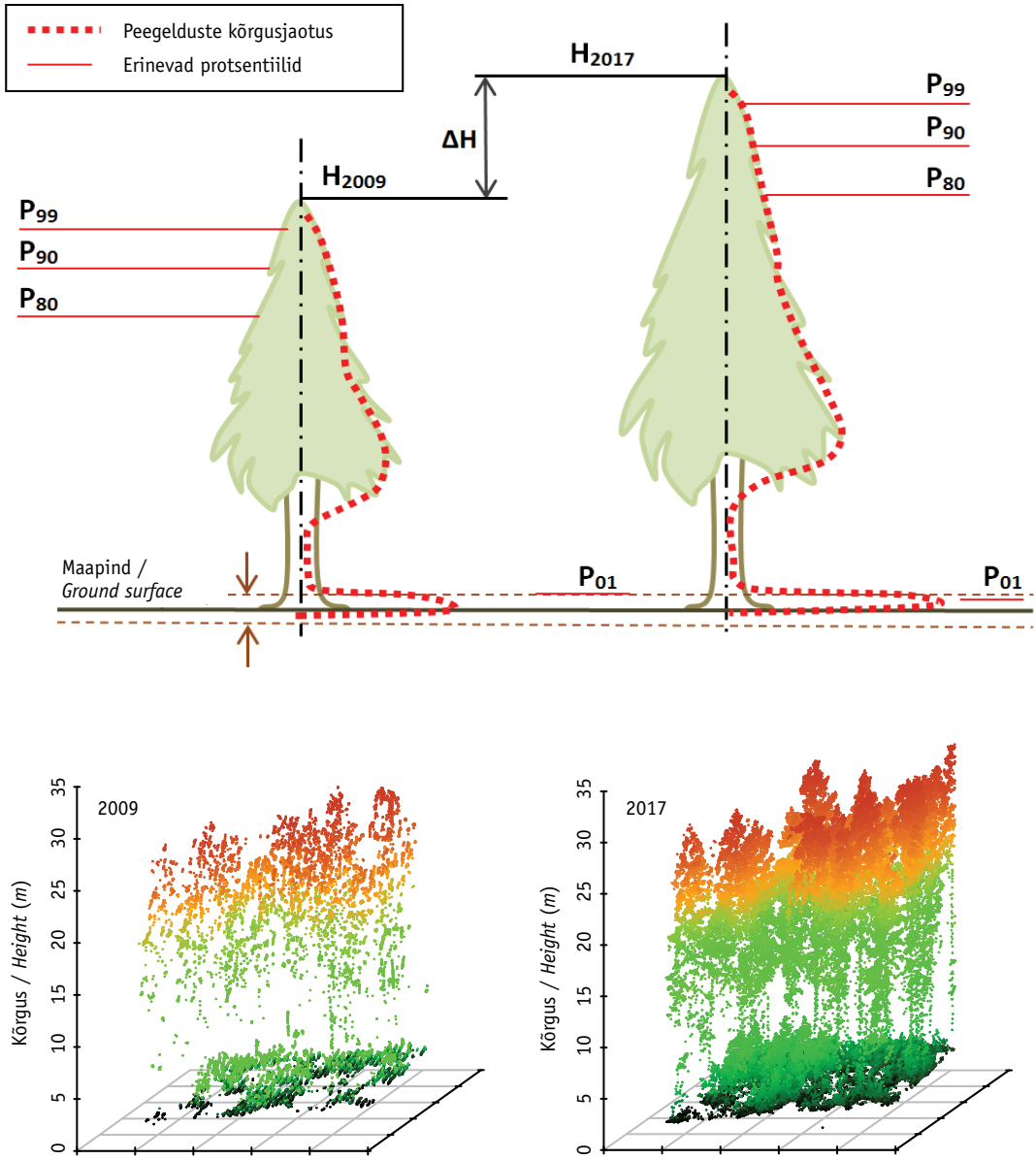
$$H_{pr} = f(A_1, H_1, A, OHOR, PE, TEKE) \quad (1)$$

kus prognoositav kõrgus (H_{pr}) vanuses A arvutatakse lähtuvalt teadaolevast kõrgusest H_1 vanuses A_1 , kasvukohatüübi mulla kõduhorisondi tusedusest $OHOR$, enamuspuuliigist PE ja puistu tekkeviisist $TEKE$, mis võib olla kas looduslik või kultuur (Kiviste, 1997). Kõrguse diferentsimudeli kasutajafunktsioon enamlevinud modelleerimiskeskondade jaoks (R, FoxPro, Excel, OpenOffice) on allalaaditav infosüsteemist FORMIS (<https://formis.emu.ee>; ID = 9).

Andmeanalüüs

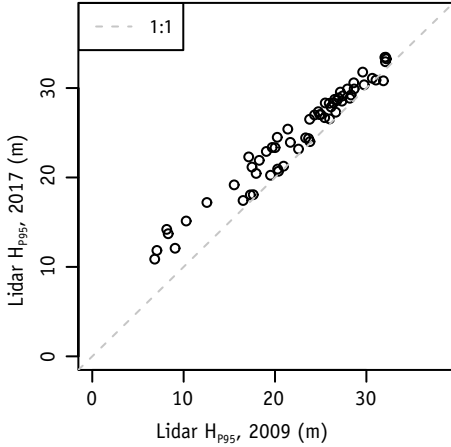
Järvelja puistute kõrguskasvu analüüsimiseks kasutati puistu esimese rinde keskmist kõrgust, mis saadi puistuelementide kõrguste rinnaspindalaga kaalutud keskmisena. Järvelja puistute kõrguse kasvu hindamiseks kahe lasermõõdistuse vahele jäävas ajavahemikus prognoositi puistutele kõrgus H_{pr} diferentsvõrrandiga (1) võttes aluseks 2011. aasta metsakorralduse andmetes oleva puistute inventeerimise aasta ja takseerandmed. Puistute kõrgus prognoositi nii 2009. kui ka 2017. aastasse ja edasi kasutati analüüsis nende kahe seisundi vahet võrdluseks lidarmõõdistuse andmetest arvutatud puistu kõrguse kasvule.

Valimisse sattunud puistu kasvukäigu proovitükkide esimese mõõtmise andmeil (enamuspuuliik, kasvukohatüüp, esimese rinde vanus ja kõrgus) arvutati diferentsvõrrandiga (1) puistu kõrguse prognoos 10 aastat edasi (H_{pr}) ning teisel mõõtmisel saadud puistu kõrguse ja prognoositud kõrguse vahe. Puistu tekkeviisiks võeti looduslik. Puistu kõrgus arvutati esimese rinde puuliikide kõrguste rinnaspindalaga kaalutud keskmisena. Kõrguskõveraks võeti Kiviste *et al.* (2003) üheparameetriline mudel, mille uuendatud parameetritega variant on allalaaditav metsanduslike mudelite infosüsteemist FORMIS (ID = 82). Puistu kõrguse ja prognoositud kõrguse keskmist vahet hinnati t-testiga ning vahet mõjutavaid faktoreid lineaarmetodite protseduuri kasutades.



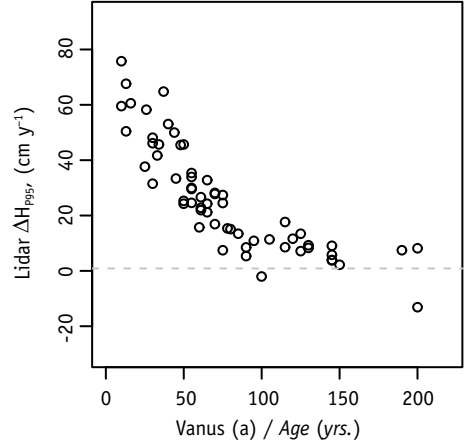
Joonis 2. Laserimpulsi peegelduste kõrgusjaotuse ülemised protsentiilid (P^*), kõrguskasv ja näide 2009. ja 2017. aasta punktipilvest.

Figure 2. An approximate position of lidar point cloud height distribution percentiles (P^*) and examples of lidar data from 2009 and 2017 measurements.



Joonis 3. Järvselja puistute 2009. aasta ja 2017. aasta lidarmõõdistusel saadud peegelduste kõrgusjaotuse 95-protsentiilid (H_{p95}).

Figure 3. Forest height growth during the period 2009–2017 based on the 95th percentile (H_{p95}) of lidar pulse return height distribution.



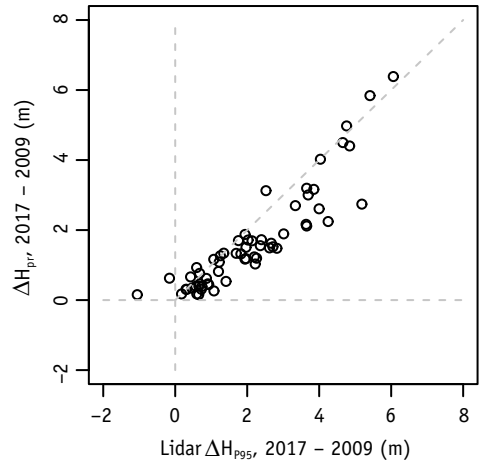
Joonis 4. Lasermõõdistusega saadud metsa kõrguskasvu hinnang ajavahemikus 2009–2017 sõltuvalt puistu vanusest.

Figure 4. Stand age dependence of airborne lidar measurements-based forest height growth estimate. The observation period ranges from 2009 to 2017.

Tulemused

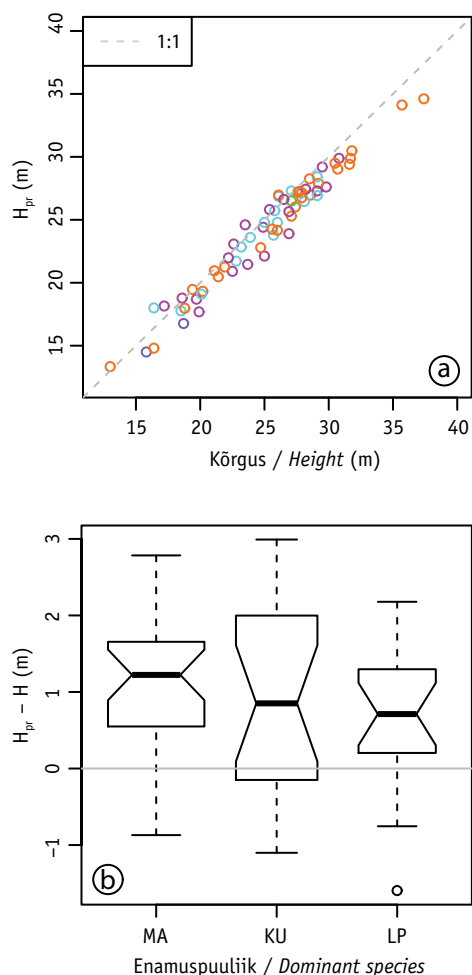
Lasermõõdistuse andmetest arvatud peegelduste kõrgusjaotuste ülemiste protsentiilide puhul ilmnes selgelt kõrguse kasv (t -test, $p < 0,01$). Noortes puistutes oli kõrguskasv suurem kui vanemates puistutes. Vanades või väheviljakatel muldadel kasvavatel metsadel oli kõrguskasv väike või isegi mõnikord negatiivne - suuremad puud surevad ja puistu laguneb (joonised 3, 4).

Kõik kasutatud kõrgusjaotuse ülemised protsentiilid v.a H_{p80} kasvasid keskmiselt kiiremini kui puistu kõrguse diferentsmudeliga ennustatud puistu kõrguse muutus ajavahemikus 2009–2017 (t -test, $p < 0,05$). Puistute kõrgus 8-aastase perioodi lõpus oli lidarmõõdistuse andmetel sõltuvalt vaadeldavast kõrgusjaotuse protsentiilist 0,38–0,48 m (standardviga $< 0,1$ m) suurem kui diferentsvõrrandiga prognoositud. H_{p80} puhul keskmiselt erinevust diferentsvõrrandiga prognoositud kõrguse kasvust ei saanud statistiliselt usaldusväärselt tõestada, kuigi hajuvusdiagramm oli üldiselt sarnane kõrgemate protsentiilide seosele (joonis 5). Kõrgusjaotuse madalamate



Joonis 5. Järvselja puistute korduval lasermõõdistusel (H_{p95}) ja puistu kõrguse diferentsmudeliga (1) saadud metsa kõrguse H_{pr} kasvu võrdlus ajavahemikus 2009–2017.

Figure 5. Lidar measurements indicate greater height increment compared to old inventory data-based algebraic difference model (1) prediction H_{pr} .



Joonis 6. (a) Püsiproovitükkidelt mõõdetud ja diferentsmodeliga prognoositud puistu kõrgused (värvid peapuuliikidele on vastavalt metsakorralduse juhendile). b) 10-aastase perioodi kõrguskasvu erinevus diferentsmodeli prognoosist karpdiagrammidena peapuuliikide järgi.

Figure 6. (a) Measurements in permanent sample plots indicate greater height increment during the last ten year period compared to old inventory data-based algebraic difference model prediction H_{pr} (colours correspond to tree species). (b) The increased height increment is present all stands dominated with pine (MA), spruce (KU) and deciduous broadleaf tree species (LP).

protsentiilide väärtuseid mõjutab puistu võrastiku liituse ja katvuse muutus, mis tuleneb puude võraraadiuste kasvust või alameetodil tehtud harvendusraietest. Testist jäeti välja lagunev, surevate puudega 200 aasta vanune kuusik, mille puhul lidarmõõdistuse andmetes esines kõikide ülemiste kõrgusprotsentiilide kahanemine. Ainult valimi kõige nooremates puistutes kaldus puistu kõrguse diferentsmodel prognoosima suuremat kõrguse kasvu kui ilmnis lasermõõdistuse andmetest.

Metsa kasvukäigu proovitükkidel kasvavate puistute kõrgus 10 aasta möödumisel osutus keskmiselt 0,92 m (standardviga 0,12 m) võrra suuremaks kui diferentsvõrandiga prognoositud (joonis 6). Proovitükkide kõrguse ja prognoosi erinevus sõltus eelkõige puistu vanusest, aga ka harvendusraietest, mille mõju oli 0,54 m (standardviga 0,3 m).

Arutelu

Nii Järvelja puistute laserskaneerimise andmete põhjal kui ka Järvelja ümbruse jäävatel metsa kasvukäigu püsiproovitükkidel tehtud mõõtmiste kohaselt kasvab puistute kõrgus üldiselt kiiremini kui prognoosib Eesti puistute ajavahemiku 1984–1993 takseerkirjeldustele tuginev Kiviste (1997) diferentsmodel. Lidariga tehtud kordusmõõdistuse andmete põhjal puistute kõrguskasvu hindamisel on oluline maapinna kõrguse täpne määramine. Peegelduste kõrgusjaotuse 1-protsentiilide erinevus oli kahe mõõdistuse andmete puhul ülemiste protsentiilide kasvuga (u 2 m) võrreldes tühine. Puistu kõrguse kasvu hindamiseks kasutatavad peegelduste kõrgusjaotuse ülemiste protsentiilide väärtused võivad olla mõjutatud impulsiga valgustatud ala suuruselt ja skaneerimise tulemuseks saadud punktipilve tihedusest. Suurema hetkevaatevälja ja madalama punktiheduse korral ei kajastu andmestikus puude ladvad vaid pigem võra- de ülemised oksad. Käesolevas uurimuses

kasutati suure punktitiheidusega ja väikese hetkevaateväljaga (7–10 cm) skaneerimisandmeid, mis jäädvustavad puuvõrade ülaosa struktuuri üsna hästi. Laserimpulsi peegelduste kõrgusjaotuse ülemiste protsentilide asukohti mõjutab ka puuvõrade kuju ja lehemassi jaotus võras. Kui näiteks puude võrad muutuvad vananedes ülaosas laiemaks või lehtpuudel isegi üsna lamedaks, siis tekib rohkem peegeldusi kõrgemalt ning laserskaneerimise andmetest saadud puistu kõrguse hinnang kasvab rohkem kui ladva järgi mõõdetuna. Kantola & Mäkelä (2004) märgivad aga, et harilikul männil võra kuju vanusega oluliselt ei muutu ning kuusikutes võtab oluliste muutuste ilmnemine vähemalt 40 a. Ka Yu *et al.* (2006) näitasid, et lidarmõõdistusega ja maapealsete mõõtmistega saadud puude kõrguskasvude hinnangud on üsna hästi kooskõlas. Seega võib lidarmõõdistuse andmete põhjal saadud puistute kõrguse muudu hinnangut pidada usaldusväärseks.

Nii Järvelja puistute kõrguskasv lidar-mõõtmiste alusel kui ka metsa kasvukäigu proovitükkidel tehtud puude kõrguste mõõtmiste järgi saadud kõrguskasv oli suurem kui diferentsvõrrandiga prognoositud. Lidarmõõdistusel põhinev Järvelja puistute kõrguskasv oli küll metsa kasvukäigu proovitükkidel olevate puistute kõrguskasvust oluliselt väiksem, kuid ka Järvelja puistute valimi keskmine boniteet oli keskmiselt poole klassi võrra madalam. Ka oli Järvelja puistute valimi keskmine vanus suurem ehk 2009. aastal 66 aastat võrreldes metsa kasvukäigu proovitükkidel kasvavatel puistute vanusega 54 aastat perioodi alguses.

Esmapiilgul võiks järeldada, et Kiviste (1997) mudel ei sobi puistu kõrgusekasvu prognoosimiseks, sest samadel puistutel mõõdetud kõrguse kasv kümne aasta jooksul ületas mudeliga prognoositu (seda nii püsiproovitükkide kui ka lidarmõõtmise andmeil). Seda, et mudel intensiivsel kasvuperioodil puistu kõrguskasvu alla hindab, on tõdetud ka metsakorralduse praktikas (Enn Pärt, kirjavahetus,

17.01.2018). Samas lähendas antud mudel 1984–1993. aastate metsakorralduse takseerikirjelduste andmeil koostatud metsatüüpide aegridu piisava täpsusega (Kiviste, 1997). Selle mudeli kuju oli üsna heas kooskõlas ka hilisemate metsakorralduste andmeil koostatud metsatüüpide aegridadega, ehkki mudeli asümptoodiparameetri hinnangud hilisematel andmetel olid mõnevõrra suuremad (metsatüüpide keskmised boniteetidid paranesid). Selline olukord, kus puistute kordusmõõtmiste andmeil koostatud kasvukäik erineb erivanuselistest puistute üksikmõõtmiste andmeil koostatud aegreast, saab tekkida siis, kui puistu kasvukäik (kasvutingimused) ajas muutub. Mudelarvutuslikus katses, kus imiteeriti puistu kõrgusindeksi H_{50} pidevat suurenemist 4 cm aastas, tekkis praegusele väga sarnane olukord (Nilson & Kiviste, 1986; Kiviste, 1999), kus erivanuselistest puistute andmeil koostatud kõrguse aegrida oli samamoodi kumeram kui puistu tegelik kasvukäik. Enam-vähem samasugused tulemused saadi ka siis, kui Kiviste (1997) mudeli asemel kasutati Orlovi boniteerimistabelite lähendmudelit (Kiviste, 1999).

Metsa kasvu modelleerimine ajas muutuvate kasvutingimuse korral on tunduvalt keerulisem kui traditsiooniline puistu kasvukäigu modelleerimine (vaikimisi) kasvutingimuste konstantsust eeldades. Metsa kasvu kiirenemist Eestis võib põhjustada intensiivne metsamajandamine (metsa uuendamise materjali kvaliteedi tõstmine, noorendike hooldamine, harvendusraied, kuivenduse pikaajaline mõju jne), aga ka üldine keskkonna muutumine (süsihappegaasi kontsentratsiooni suurenemine atmosfääris ja sellest tingitud soojenemine, õhu- ja saaste toimimine metsamulla väetisena).

Puistu kasvukäigu edasisel modelleerimisel tuleb ilmselt loobuda metsakorralduse keskmiste takseertunnuste aegridade kasutamisest algandmetena ja selle asemel kasutada puistute kordusmõõtmiste andmeid (metsakorralduse takseerikirjeldustest, püsiproovitükkidelt või lidarmõõtmistest). Kõrguskasvu muutuse täpsemaks

analüüsiks oleks vajalik puistu kõrgusena keskmise kõrguse asemel ülakõrguse kasutuselevõtmine. Ülakõrgus ei ole nii tundlik hooldusraiatele kui keskmine kõrgus, mistõttu see sobiks kasvutingimuste kirjeldamiseks paremini kui keskmine kõrgus. Hetkel mõjutavad kõik eelpool loetletud potentsiaalsed mõjufaktorid kõrguskasvu positiivses suunas, kuid edaspidi võib olukord muutuda. Seetõttu tuleb jätkuvalt koguda andmeid metsa kohta, eelkõige muidugi jätkata mõõtmisi püsiproovitükkidel, aga vähemtähtis ei ole ka varasemate metsakorralduse takseerikirjelduste, kaugseire ja muu metsainfo säilitamine edasiseks töötlemiseks sobival kujul.

Tänuavaldused. Uurimus on osa Eesti Teadusagentuuri finantseeritavast projektist IUT21-4. Autorid tänavad Eesti Maa-ametit testlendude andmete kasutamise võimaluse eest. Mait Metsur ja Erkko Grünthal Eesti Maa-ametist selgitasid Riegl-i laserskanneri tehnilisi eripärasid. Metsa kasvukäigu uuringute proovitükkide võrgustiku rajamist toetas Riigimetsa Majandamise Keskus ja kordusmõõtmiste korraldamist SA Keskkonnainvesteeringute Keskus. Autorid tänavad retsensente abistavate märkuste eest. Täname Enn Pärti kasulike tähelepanekute eest.

Lisa 1. Tabel A1. Puuliikide koodid.

Appendix 1. Table A1. Tree species codes.

Puuliigi kood / Tree species code	Puuliik Species name
HB	Harilik haab (<i>Populus tremula</i> L.)
KS	Arukask, sookask (<i>Betula pendula</i> Roth, <i>Betula pubescens</i> Ehrh.)
KU	Harilik kuusk (<i>Picea abies</i> (L.) Karst.)
LM	Sanglepp (<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertn.)
MA	Harilik mänd (<i>Pinus sylvestris</i> L.)
PN	Harilik pärn (<i>Tilia cordata</i> Mill.)

Kasutatud kirjandus

- Hari, P., Arovaara, H., Raunemaa, T., Hautojärvi, A. 1984. Forest growth and effect of energy production: a method of detecting trends in the growth potential of trees. – Canadian Journal of Forest Research, 14, 437–440.
- Isenburg, M. 2017. LAStools - efficient LiDAR processing software. [WWW document]. – URL <http://rapidlasso.com/LAStools> [Downloaded 17 October 2017, uncensored].
- Kantola, A., Mäkelä, A. 2004. Crown development in Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). – Trees, 18, 408–421.
- Kiviste, A. 1995. An analysis of main forest inventory variables in the Estonian state forests. (Eesti riigimetsa puistute kõrguse, diameetri ja tagavara sõltuvus puistu vanusest ja kasvukohatingimustest 1984.–1993. a. metsakorralduse takseerikirjelduste andmeil). – EPMÜ teadustööde kogumik, 181, 132–148. Tartu, Eesti Põllumajandusülikool. (In Estonian).
- Kiviste, A. 1997. An algebraic difference model for the forest growth simulation in Estonia (Eesti riigimetsa puistute kõrguse, diameetri ja tagavara vanuseridade diferentsimudel 1984.–1993. a. metsakorralduse takseerikirjelduste andmeil). – EPMÜ teadustööde kogumik, 189, 63–75. Tartu, Eesti Põllumajandusülikool. (In Estonian).
- Kiviste, A. 1999. Site index change in the 1959s–1990s according to Estonian forest inventory data. – Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe. EFI Proceedings, 27, 87–100.
- Kiviste, A., Hordo, M., Kangur, A., Kardakov, A., Laarmann, D., Lilleleht, A., Metslaid, S., Sims, A., Korjus, H. 2015. Monitoring and modeling of forest ecosystems: the Estonian Network of Forest Research Plots. – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 62, 26–38.
- Kiviste, A., Nilson, A., Hordo, M., Merenäkk, M. 2003. Diameter distribution models and height-diameter equations for Estonian forests. – Amaro, A., Reed, D., Soares, P. (eds.). Modelling forest systems. CAB International, 169–179.
- Krigul, T. 1972. Forest mensuration. (Metsatakseerimine). Tallinn, Valgus, 108–109. (In Estonian)
- Kuusk, A., Lang, M., Kuusk, J. 2013. Database of optical and structural data for the validation of forest radiative transfer models. – Kokhanovsky, A.A. (ed.). Radiative Transfer and Optical Properties of Atmosphere and Underlying Surface. Light Scattering Reviews, 7, Springer, 109–148.
- Lang, M., Arumäe, T., Anniste, J. 2012. Estimation of main forest inventory variables from spectral and airborne lidar data in Aegviidu test site, Estonia. – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 56, 27–41.
- Leica. 2009. Leica ALS50-II airborne laser scanner product specifications. Leica Geosystems AG Heerbrugg, Switzerland.
- Magnussen, S., Boudewyn, P. 1998. Derivations of stand heights from airborne laser scanner data

- with canopy-based quantile estimators. – Canadian Journal of Forest Research, 28, 1016–1031.
- Mathiesen, A. 1940. Virgin forest and its aspect. (Ürgmetsast ja selle ilmet). Tohver, R., Tallinn. (In Estonian).
- McGaughey, R.J. 2016. FUSION/LDV: Software for LIDAR data analysis and visualization. October 2016 – FUSION Version 3.60+. Pacific Northwest Research Station, United States Department of Agriculture Forest Service.
- Metsakorralduse. 2017. Forest inventory act. (Metsa korraldamise juhend). – RT I, 22.02. 2017, 11. (In Estonian).
- Metslaid, S., Sims, A., Kangur, A., Hordo, M., Jõgiste, K., Kiviste, A., Hari, P. 2011. Growth patterns from different forest generations of Scots pine in Estonia. – Journal of Forest Research, 16(3) 237–243.
- Nilson, A., Kiviste, A. 1984. Männikute „kasvukäigu“ mudel tüpiseerimata kasvutingimuste järgi. – EPA teadusliku tööde kogumik, 151, 50–59. (In Estonian)
- Nilson, A., Kiviste, A. 1986. Reflection of environmental changes in models of forest growth composed using different methods. – Monitoring of forest ecosystems. Abstracts of scientific conference. Kaunas, 05–06.06.1986. Kaunas–Academy, 336–337. (In Russian).
- Nilson, A., Kiviste, A., Korjus, H., Mihkelson, S., Etverk, I., Oja, T. 1999. Impact of recent and future climate change on Estonian forestry and adaptation tools. – Climate Research, 12, 205–214.
- Riegl. 2017. Dual channel waveform processing airborne LiDAR scanning system for high-point density and ultra wide area mapping: Riegl VQ-1560i datasheet. [WWW document]. – URL <http://www.riegl.com/nc/products/airborne-scanning/produktdetail/product/scanner/55/> [Accessed 03 November 2017].
- Spiecker, H., Mielikäinen, K., Kohl M., Skovsgaard, J. (eds). 1996. Growth trends in European forests: studies from 12 countries. Springer, Berlin.
- Tappo, E. 1982. Mean characteristics of forest stands in Estonia by dominant species, site fertility and age. (Eesti NSV puistute keskmised takseertunnused puistu enamuspuuliigi, boniteedi ja vanuse järgi). Tallinn, Eesti NSV Põllumajandusministeeriumi Informatsiooni ja Juurutamise Valitsus. 72 pp. (In Estonian).
- Yu, X., Hyypä, J., Kukko, A., Maltamo, M., Kaartinen, H. 2006. Change detection techniques for canopy height growth measurements using airborne laser scanner data. – Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72, 1339–1348.


Estimation of change in forest height growth

Mait Lang, Tauri Arumäe, Diana Laarmann and Andres Kiviste

Summary

First signs of increased forest growth rate in Estonia were found by Nilson & Kiviste (1984) who analysed stand height dependence on age using forest inventory database records. In the same year Hari *et al.* (1984) published a hypothesis about increased forest growth rate based on increment cores taken from strictly protected forests. During following decade several publications about changes in forest growth were published (Spiecker *et al.*, 1996). However, there is still a question whether the increase in forest growth rate continues or has it reached its asymptote. In this study, height growth of middle-aged and older hemiboreal forests was analysed.

The empirical data was obtained from 61 forests stands (Table 1) with repeated airborne laser scanning data located in

Järvelja, South-East Estonia and secondly from 66 permanent sample plots (Table 2) belonging to the Estonian Network of Forest Research Plots (Kiviste *et al.*, 2015) and located within 50 km range from Järvelja. The airborne laser scanning of Järvelja forest stands was carried out in 30.07.2009 for the Radiative transfer Model Intercomparison (RAMI) experiment (Kuusk *et al.*, 2013) and was repeated in 16.06.2017 by Estonian Land Board using Leica ALS50-II and Riegl VQ-1560i scanners. Mean point density was in 2009 23.7 p m⁻² and 161.3 p m⁻² in year 2017 (Figure 2). For each forest stand point heights were normalized using 1st percentile of point cloud height distribution which was strongly correlated between 2007 and 2017 flights (Table 2). Lidar data were processed using  tools (Isenburg, 2017)

and FUSION (McGaughey, 2016). From the normalized to ground level point cloud for each stand 80th, 90th, 95th and 99th percentiles for first returns were extracted. For the permanent sample plots, first (upper) tree layer mean height was calculated using height curve fitted on sample tree measurements and basal area of trees was used for weight. Repeated measurements from each sample plot with 10 year interval were used for height growth calculation. For Järvelja forest stands and for permanent sample plots an old inventory data-based algebraic difference model (1) (Kiviste, 1995; 1997) was used to predict height (H_{pr}) for selected age (A) of each forest stand. The selected stand ages corresponded to the years of lidar measurements or the last measurement on permanent sample plots. The model additional parameters are known height H_1 at age A_1 , soil organic layer thickness OHOR, stand origin (natural or cultivated) and dominant species. The model (1) is based on the 1984–1993 forest inventory data of Estonian State forests and represents forest growth conditions for the period in Estonia.

All the upper percentiles of lidar point cloud height distribution increased in all forest stands in Järvelja except in one old Silver birch stand and in one 200-years old Norway spruce stand where many tall

trees were dead since 2009 (Figure 3). The increment in point cloud upper percentiles was greater in younger stands (Figure 4). In average, the increment in point cloud upper percentile values was 0.38–0.48 m greater (standard error < 0.1 m) than the height growth predicted with the model (1) (Figure 5) for the stands. Similar but even greater difference (0.92 m, standard error 0.12 m) was observed in permanent sample plots (Figure 6) between measurements and the model prediction. This can be well explained by the mean age (54 years) of the forest which was 12 years less than the age of Järvelja stands and also the mean site fertility in permanent sample plots was significantly greater.

The difference between the two data sets was explained by their mean age and site class, but the increased forest height growth compared to the old forest inventory data indicates improved growth conditions of forests in the test area. The results hint also that empirical data-based forest growth models need to be updated to avoid biased growth estimates. It is also important to continue tree measurements on the Estonian Network of Forest Research Plots (Kiviste *et al.*, 2015), while such time series are very valuable for detecting future trends in forest growth.

Received November 15, 2017, revised January 15, 2017, accepted January 29, 2018