Kasvutingimuste lineaarse muutumise mõju uurimine puistu kõrguse kasvukõverale simulatsioonide abil männikutes

Artur Nilson

Nilson, A. 2011. Simulated change of stand height growth curves as the result of linear change of growth conditions in the case of Scotch Pine stands. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 55, 64–79. ISSN 1406-9954.

Abstract. The height growth curves of Scotch Pine (*Pinus sylvestris* L.) stands were simulated for stands with initial height asymptote H_∞ 15 m, 25 m and 35 m and with linear change p of the potency of growth conditions $0.5\% \text{ yr}^{-1}$, $0.2\% \text{ yr}^{-1}$, $0.1\% \text{ yr}^{-1}$, $-0.2\% \text{ yr}^{-1}$ and with no change as the base. Different models to transmit the changing growth potential into stand growth were used: changing the efficient length of growth year replacing the stand age t with the expression $t(1 + tp)$ with fixed H_∞ in variant (1b) or calculating the current asymptote $H_{\infty,t}$ as the expression $H_\infty(1 + tp)$ corrected for asymptotic approaching the species specific asymptote $\sup(H_\infty)$. Current annual increment CAI in the last case was calculated using the equations $CAI_t = f(t, H_{\infty,t})$ in variant (3ct), $CAI_t = f(H, H_{\infty,t})$ in variant (4ch) and $CAI_t = f(H, H_{\infty,t}) * (1 + p/2)$ in variant (4chb). The height H_t in the last 3 cases was calculated as ascending sum of CAI_t . Figures of the functions $H_t = f(t, H_\infty)$ and $CAI_t = f(H, H_\infty)$ indicated the last as more informative about the changes in the shape of curves. The results of approximation of simulated curves with five different functions indicated the possibility of their modeling using traditional functions and fixed value of height asymptote. The fit was the poorest for variants 4ch and 4chb. The function for conversation the apparent growth curve based on unique height measurements into real one and vice versa was deduced for version 1b. The need to make distinct difference between the past, present and future growth in growth modeling was underlined.

Key words: simulation, change, growth potency, height growth, asymptote.

Author's address: Institute of Forestry and Rural Engineering, Estonian University of Life Sciences. Kreutzwaldi 5, 51014 Tartu, Estonia, e-mail: artur.nilson@emu.ee

Sissejuhatus

Puistu kõrgust ja kõrguse kasvu loetakse kõige paremateks puistu tootlikkuse kaudse hindamise tunnusteks. Puistu potentsiaalset tootlikkust iseloomustatakse kõige sagedamini puistu kõrgusega fikseeritud standardvanuses ehk nn kõrgusindeksiga. Eesti normdokumentides on kõrgusindeksi standardvanuseks 100 a. Indeks H_{100} enamasti teisendatakse harjumuslikuks täisarvuliseks boniteediklassiks vahemikus 0–6 (Keskonnaministri..., 2009). Teadustöös kasutatakse standardvanusena peamiselt 50 a.

Suvalise vanusega puistu kõrgusindeksi hindamiseks tuleb kõrguse väärtus standardvanuses välja arvutada hetke vanuse ja kõrguse järgi. Kui arvutamise võrrand ei vasta kasvukõvera kujule, siis saadakse vigastena nii metsa kõrguse kui ka sellega seotud tunnuste (nt tagavara, rinnaspindala, puude arvu jt) kasvu prognoosid. Prognoosivigadest tulenevad väärtused metsade majandamisel ja nendega seotud kahjud. Kõrguse kasvukõvera kuju võimalikult täpne teadmine on nii teadusliku kui praktilise tähtsusega.

Kõrgusindeksi hinnang on täielikult mudelile tuginev suurus ja standardvanusest erinevas vanuses saadakse samale puistule erinevate võrranditega erinevaid hinnanguid. Puistute kõrgusindeksi väärtus on "naturaalne" vaid standardvanuses.

Kõrgusindeksi ja üldse dendromeetriiliste meetodite suuremat täpsust ja eeliseid botaaniliste ja metsatüpoloogiliste meetodite ees on veenvalt kirjeldatud ja põhjendatud J. P. Skovsgaardi ja J. K. Vanclay töös (2007). Toogivõime hinnangute varieeruvus kasvukohatüübi piires on praktilistes rakendustes enamasti suurem tüübiskeemi autorite poolt niigi suureks hinnatust. Kõrgusindeksi täpsus potentsiaalse toogivõime iseloomustajana jääb maha vaid vahetult mahu juurdekasvule, enamasti keskmise juurdekasvu maksimumile, tuginevaist hinnangutest, kuid ületab märgatavalt kasvukohatüübile tuginevate hinnangute täpsust.

Puistute kõrguse kasvukõvera uurin-gutes on alanud uus etapp. Kui seni eeldati kasvukõverate modelleerimisel vaiki-misi, et puistute kasvutingimused on ena-masti püsivad, siis viimastel kümnenditel on jõutud arusaamani, et kasvutingi-mused on muutuvad praegu, on muutunud minevikus ja saavad muutuma ka tulevikus, kord aeglasemini kord kiiremini. Metsa kasvukiiruse muutused on olnud ja on ennustuste kohaselt ka tulevikus sedavõrd suured, et sellega seotud probleemistik on omandanud praktilise tähenduse ega ei ole enam pelgalt akadeemiline küsimus.

Metsa kasvutingimuste sujuv parane-mine lähiminevikus kliima muutuste ja saasteväetise mõjul koos sellega kaasneva metsa kasvu kiirenemisega on Euroopas üldse ja eriti selle põhjapoolsetes piirkon-dades saanud kinnituse paljudes uuringu-tes (Karjalainen *et al.*, 1999; Climate..., 2004). Tõnu Oja (1998) prognooside kohaselt võib järgmise 100a jooksul metsa lehestiku-okastiku mass suureneda kuni $0,4\% \text{ a}^{-1}$ ja tüvepuidu mass $0,3\% \text{ a}^{-1}$. Taimede kevadine

õitsemise algus on lähiminevikus muutu-nud varasemaks arvestusega 5–17 päeva 100 a kohta (Ahas *et al.*, 1998; Saar & Saan, 1993). Metsa kasvukiiruse sujuvat muutu-mist võib põhjustada ka metsakuivenduse positiivne järelmõju korras hoitava kuiven-dussüsteemi korral või negatiivne kuiven-dussüsteemi amortiseerumise korral.

Metsa kasvu lihtsad mudelid, enamasti ühevanuseliste puhtpuistutele, koostati kuni viimase ajani kasvutabelite kujul. Almandmed siluti kas graafiliselt joonistel või analüütiliselt võrrandite abil. Nendes mudelites eeldati vaikumisi kasvutingi-muste stabiilsust. Almandmeteks olid tava-liselt mingi eelduse kohaselt ühesuguse kasvuga gruppideks jagatud puistute vanu-seridadesse kuuluvate puistute ühekordse mõõtmise andmed. Suurem osa endise Nõukogude Liidu kasvutabeleist koosta-tigi ajutiste proovitükkide või metsakorralduse takseerikirjelduste staatiliste andmete põhjal. Staatilist andmestikku on kasutatud ka teistes riikides.

Stabiilsetes kasvutingimustes peegeldab hästi valitud puistute vanuseridade staati-line ühekordse mõõtmise andmestik ka tegelikku kasvu moonutatusteta. Muutuva-is kasvutingimustes saab metsa tegelikku kasvu modelleerida vaid dünaamilise, kordusmõõtmistega saadud või puuana-lüüsi andmestiku põhjal. Staatilised vanu-seridade andmed annavad kasvukiiruse triivi korral metsa kasvust vastassuunali-selt moonutatud pildi, kiireneva kasvu korral saadakse aeglustuva ja vastupidi, aeg-lustuva kasvu korral kiireneva, kasvu pilt (Nilson & Kiviste, 1984, 1986; Kiviste, 1998, 1999a, 1999b). See järeldus on puhtmate-maatiline ega ole vääratav. On alust kaht-lustada taolise moonutuse olemasolu pal-judes kasvutabelites ning hinnata ümber nende usaldusväärsust.

Erinevate kasvuvõrrandite eelistused on välja kujunenud stabiilse kasvu eeldu-sel ja sageli staatilise andmestiku model-leerimisel. Võrrandite pingerida ei pruugi jääda samaks muutuvates kasvutingimus-tes muutunud kasvukõverate tarvis.

Traditsiooniline kõrgusindeks peegeldab puistu kõrguse kasvu summaarset resultaati puistu tekkimise momendist kuni indeksi hindamise momendini. Muutuvas kasvutingimustes on indeksi sisu hägus. Tavamudelite järgi hinnatav kõrgusindeksi väärtus muutub siis koos puistu vanusega. Milline on sel juhul "õige" kõrgusindeks ja kuidas seda tõlgendada? Ka sama viljakusega kasvukohas erineva vanusega puistutele leitud kõrgusindeksi hinnangud kujunevad erinevateks.

Stabiilse kasvu tingimustes eeldati, et puistu kõrgusindeksi hinnang puistu kasvamise perioodil oli ja on muutumatu. Andres Kiviste analüüsis kõrgusindeksi hinnangute muutumist 43 a intervalliga koostatud takseerikirjelduste võrdlemise baasil (Kiviste, 1998, 1999; Kiviste & Korjus, 1998). Selgus, et samade puistute kõrgusindeksi hinnang viimase kirjelduse järgi oli esimese omast süstemaatiliselt ligikaudu 2 m võrra suurem. Selle võrdluse juures tuleb rõhutada sõna "hinnang" ja seda, et hinnangud saadi Andres Kiviste (1997) mudeliga. Kontrollarvutustega Orlovi boniteerimiskõverate mudeli abil saadi küll detailides mõnevõrra erinevad tulemused, kuid üldiselt samuti kõrgusindeksi suurenemine ligikaudu 2 m võrra (Kiviste, 1999a).

Muutuvates kasvutingimustes stabiilse kasvu eeldusel koostatud mudelite abil saame küll puistu kõrguse järgi antud vanuses leida hinnangu puistu mineviku keskmist kajastavale kõrgusindeksile, kuid see ei ole enam kehtiv hetkeindeksina ei minevikus ega tulevikus.

Kirjutises otsitakse ja testitakse arvutisimulatsioonide abil klassikaliste kasvuvõrrandite kasutamise võimalusi muutuvas kasvutingimustes kasvavate puistute muutunud kasvu kirjeldamiseks. Püütakse selgitada, kas ja kuidas saaks kasvukõverate sujuvat lineaarset muutumist modelleerida traditsiooniliste stabiilse kasvu mudelite täiendamisega ja milliseks võiksid kujuneda kasvukõverate kuju moonutused erinevate mõjumehhanismide model-

leerimise puhul. Vaadeldakse kahte peamist mehhanismi: kasvu muutumist seoses kasvulae (asümptoodi) muutumisega ja seoses kasvu intensiivsuse muutumisega. Analüüsitakse muutusi ka nende mõlema koosmõju korral.

Materjal ja meetodika

Puistu kõrguse asümptoodi (kasvulae) kasutamisest kõrguse mastaabikordajana

Puistu kõrguse kasvukiiruse sõltuvus kõrguse kasvulae (piirväärtuse) ja saavutatud kõrguse vahest on tegelikult mistahes kasvu olemuslik omadus. Seda asjaolu on metsanduses arvestatud alates Weberist (1891) ja kinnitatud detailsete füsioloogiliste kasvumudelitega (Eestis nt Kull & Kull, 1989). Varsti peale juurdekasvu maksimumi ehk käänupunkti vanuse t_{ip} on kõrguse juurdekasvu CAI suurus ligikaudu proportsionaalne kõrguse kasvulae H_{∞} ja kõrguse vahega, sarnaselt Weberi mudeliga $CAI \approx b(H_{\infty} - H)$.

Joonise 1 vasakpoolsel osal on tunnused esitatud naturaälväärtustena ja parempoolisel indeksina kasvulae simuleeritud väärtuste suhtes. Joonisel on kasvukõverad esitatud nagu diferentsiaalvõrrandid. Kasvulae väärtusi saab parempoolisel joonisel lugeda horisontaalteljel kohal $CAI = 0$. Jooniselt 1 näeme, et peale seda, kui kõrgus on saavutanud ligikaudu pool oma kasvulae väärtusest, saabki kõrguse juurdekasv praktiliselt proportsionaalseks kasvulae ja saavutatud kõrguse vahega ja alates suhte H/H_{∞} väärtusest $3/4$ praktiliselt sõltumatuks kõrguse kasvulae (ühtlasi boniteedi) väärtusest (vt vasakpoolne joonis). Sellise üldistujõuga kvantitatiivne seaduspärasus on bioloogias, v. a. kasvumudelites, üsna erakordne.

Andres Mathieseni (1928) ettepanek kui-vendatud metsade boniteedi hindamiseks mingi (tavaliselt viimase) kõrguse perioodi keskmise juurdekasvu PAI ja kõrguse H abil ilma vanust kasutamata tugineb vastassuunalisele sõltuvusele. Joonis 1 on ka selle võimaluse illustatsiooniks.

Joonis 1. Kõrguse hetkjuurdekasvu CAI vaibumine kõrguse H lähenemisel tema kasvulae H_∞ võrrandi (4) järgi.

Figure. 1. The extinction of CAI with the value of height H approaching its asymptote H_∞ by eq. (4).

Käesoleva kirjutise mudelites kasutatakse puistu kõrguse kasvu mastaabitegurina kõrguse kasvulae e asümptoodi väärtust. See sisaldub ilmutatud või ilmutamata kujul kõigis asümptootilistes kasvufunktsioonides. Selleks, et funktsiooni lugeda tõeliste kasvufunktsioonide hulka kuuluvaks, on tema asümptootilisust loetud (nt. Peschel, 1938) ja loetakse (nt Kiviste, 1988; Kiviste *et al.*, 2002) funktsiooni obligatoorseks omaduseks.

Kasvulae eelistamine baasvanuses hinnatud kõrgusele tugineb sellele, et

1. kasvatunnuse juurdekasvu füsioloogiliseks aluseks ei loeta mitte niivõrd vanust, kui vanade teooriate (alates Weberist, 1891) ja uute füsioloogiliste mudelite (Kull & Kull, 1989) kohaselt, kasvatunnuse väärtuse erinevust tema kasvulaest,
2. kasvulagi on vaba boniteerimise baasvanuse valiku tinglikkusest,
3. teades kasvuvõrrandi kasvulae väärtust, saame arvutada kõrgusindeksi SI või kõrguse mistahes vanuses,
4. häiringute järgne "kasvufüsioloogiline" või majanduslik vanus pole samane

kalendaarsega. Traditsiooniline SI on siis raskesti tõlgendatav. Boniteedi kasutamisel SI asemel seda probleemi ilmutud kujul ei olnud ja ei ole üldse kasvulae kasutamise korral.

Erinevate asümptootiliste võrranditega saadud kõrguse kasvulae hinnangud ei ole omavahel hästi võrreldavad. Andmeid väga vanade puistute kohta on napilt ja kasvulae väärtuse hinnang tugineb ekstrapolatsioonile oletatavasse, kuid andmetega kinnitamata, tulevikku. Erinevad funktsioonid võivad küll ühtmoodi hästi lähendada puistute kasvu majanduslikku huvi pakkavas vanusevahemikus, kuid väga erinevalt ekstrapoleerida kõrgust selle kasvulaeks tegelikult olematusse lõpmatusse vanusesse. Kõrguse kasvulae hinnangud on võrreldavad vaid hinnatutena ühe ja sama võrrandiga ja ühte ja samasse süsteemi kuuluvate parameetritega.

Sellegipoolest on kasvulae kasutamine kõrguse kasvu modelleerimisel ühe ja sama kasvufunktsiooni kasutamise tingimustes paljulubav, sest kasvulae ja kõrguse kombinatsiooni kasutamisega viiakse kasvumudelitesse arvestatavalt põhjuslikkuse elemente.

Andmed ja simuleerimise mudelid

Algandmetena männikute kõrguse kasvu mudeli (6a) parameetrite hindamiseks kasutati 270 kasvurea andmeid autori kasvukäigu tabelite kollektsioonist MS VisualFoxPro® andmebaasis. Tabelid on praegu Allan Simsi poolt redigeerituna ja täiendatuna EMÜ metsakorralduse osakonna mudelite baasis <http://formis.emu.ee/gytbls/>. Eesti männikute kõrguse liigiomase kasvulae hindamiseks tehti päring Riikliku Metsaregistri takseerikirjeldustest seisuga 01.09.2008, kus 32 kõrgeima, enam kui 30 m kõrgusega, männiku kõrguse arvutatud kasvulagi kuulus 31 juhul vahemikku 38,5–40,9 m. Prof. Endel Laasi (1987) järgi on harilikku männi üldine maksimumkõrgus 40 m (50 m). Eesti männikute kõrgusekasvu liigiomase kasvulae väärtuseks valiti 40 m. Valitud väärtus ei ole käesoleva töö eesmärgi suhtes kriitiliselt oluline.

Töö peamised tulemused saadi teoreetiliste simulatsioonidega kasutades selleks Mitscherlichi funktsiooni (1) ja selle teisendusi:

$$H(H_{\infty}, t) = H_{\infty} [1 - \exp(-bt)]^c \quad (1)$$

$$t(H_{\infty}, H) = -\log[1 - (H/H_{\infty})^{1/c}] / b \quad (2)$$

$$CAI(H_{\infty}, t) = H_{\infty} bc [1 - \exp(-bt)]^{c-1} \exp(-bt) \quad (3)$$

$$CAI(H_{\infty}, H) = bcH [(H_{\infty}/H)^{1/c} - 1] \quad (4)$$

$$t_{ip} = \exp(3.64299865 - 0.02841701 H_{\infty}) \quad (5)$$

$$H(H_{\infty}, t) = H_{\infty} (1 - \exp(-bt))^{\exp(b \cdot t_{ip})} \quad (6)$$

$$H(H_{\infty}, t) = H_{\infty} (1 - \exp(-0.02184t))^{\exp(b \cdot \exp(3.64299865 - 0.02841701 H_{\infty}))} \quad (6a)$$

$$H_{\infty, t} = H_{\infty, t-1} [1 + p(1 - H_{\infty, t-1} / H_{\infty, sp})] \quad (10)$$

$$H = H_{\infty} \{1 - \exp[-bt(1 + tp)]\}^c \quad (1b)$$

$$CAI = H_{\infty} bc [1 - \exp(-bt)]^{c-1} \exp(-bt) \quad (3ct)$$

$$CAI = bcH [(H_{\infty, t}/H)^{1/c} - 1] \quad (4ch)$$

$$CAI = (1 + tp/2) bcH [(H_{\infty, t}/H)^{1/c} - 1] \quad (4chb)$$

kus b ja c – funktsiooni (1) ja selle teisenduste parameetrid,

b – parameetrite vektor, *vector of parameters*,

CAI – puistu kõrguse hetkjuurdekasv $m a^{-1}$, *current annual increment of height $m yr^{-1}$* ,

H – puistu keskmine kõrgus m , *mean height m* ,

H_{∞} – kõrguse kasvulagi, kasvukõvera asümptoot m , *asymptote of height m* ,

$H_{\infty, sp}$ – liigiomane kõrguse kasvulagi m , *species specific asymptote of height m*

$H_{\infty, t}$ – muutuva kasvulae väärtus vanuses t m , *value of the changing asymptote at the age t m* ,

log – naturaallogaritm, *natural logarithms*,

p – kasvutingimuste aastase muutumise kordaja osana algväärtusest, *coefficient of the change of the growth potential as portion of the initial value*,

t – puistu vanus a , *age of stand yr* ,

t_{ip} – kõrguse kasvukõvera käänupunkti vanus a , *age of the inflection point of the height growth curve yr* .

Võrrandite (1)–(6a) vasakul poolel on näidatud funktsioontunnuse ja sulgudes argumentide nimed.

Võrrandi (1) ja selle teisenduste parameetrite b ja c hindamiseks kasutati Andres Kiviste (1987, 1988, 1995, Kiviste *et al.*, 2002) originaalset meetodit, mille korral ühena abimuutujatest kasutatakse käänupunkti vanuse t_{ip} sisukat ja hästi tõlgendatavat väärtust. Võrrandi (6) kujul tuleks funktsiooni kindlasti nimetada Mitscherlich-Kiviste funktsiooniks.

Funktsiooni (1) parameetrite H_{∞} , b ja c hinnangud hinnati esmalt eraldi igale reale männikute kasvutabelite 270 kasvureast kasutades järjestikkuselt programmi *optim* kaht erinevat algoritmi ja programmi *nlinb* vähimruutude kriteeriumiga süsteemi R keskkonnas (R Development..., 2011). Teisele algoritmile anti algühenditeks esimese ja kolmandale teise tulemused. Lähendi mõningast paranemist teisel või kolmandal sammul saadi üksikuhtudel.

Saadud hinnangutest arvutati igale kasvureale käänupunkti vanus $t_{ip} = \ln(c)/b$. Kasvulae H_{∞} ja käänupunkti t_{ip} 270 andmepaarist leiti kvantiilregressiooni programmiga *rq* süsteemi R paketist *quantreg* (Koenker, 2011) mediaanregressiooni võrrandi (5) parameetrite hinnangud.

Võrrand (6) oli Mitscherlichi funktsiooni

siooni parameetri $c = \exp(bt_{ip})$ hindamise meetodi aluseks. Parameetri c hinnangud leiti kõigis simulatsiooni variantides kasvulae kolme fikseeritud algväärtuse 15, 25 ja 35 m järgi. Seega variandi piires oli $c = \text{const}$ ja edasises sai kasutada Mitscherlichi originaalfunktsiooni.

Ükski kasv ei ole piirideta, ka konkreetse puistu kõrguse kasvulae suurendamine kasvutingimuste paranemisel mitte. Iga puuliigi kõrgusekasvu kasvulae piirsuuruseks võiks olla liigi maksimumkõrgus (liigiomane kasvulagi $H_{\infty,sp}$). On loogiline eeldada, et puistu kõrgusekasvu kasvulagi ei kasva kasvutingimuste potentsiaali teljel lineaarselt vaid lähenemisel liigiomasele kasvulaele samuti asümptootiliselt. Selle protsessi eksperthinnanguna kasutati Weberi (1891) head ja lihtsat mudelit diferentsiaalvõrrandi kujul. Sellega analoogiliselt tuleks kasvulae aastast kasvu p korrutada võrrandi (7) abil arvutatud suhtega c_{∞} . Kasvulae konstantsuse korral saame juurdekasvu arvutada võrrandiga (8), kuid muutuva kasvulae $H_{\infty,t}$ korral võrrandiga (9).

$$c_{\infty} = (H_{\infty,sp} - H_{\infty,t}) / H_{\infty,sp}, \quad (7)$$

$$CAI = H_{\infty} \cdot f(t, \mathbf{b}) \quad (8)$$

$$CAI = H_{\infty,t} \cdot f(t, \mathbf{b}). \quad (9)$$

Simulatsioonides kasutati kasvulae kolme algväärtust 15, 25 ja 35 m ja viit erinevat simulatsiooni varianti. Variantides kasutati stabiilse kasvu võrrandit (1) ja võrrandeid (1b), (3ct), (4ch) ja (4chb). Viimased 3 on võrrandite (3) ja (4) modifikatsioonid.

Tabel 1. Simulatsiooni variantide kirjeldused.

Table 1. Description of the simulation variants.

Võrrand Equation	Argumendid / Arguments				
	H_{∞}	$H_{\infty,t}$	t	$t(1 + tp)$	H
(1)	+		+		
(1b)	+			+	
(3ct)		+	+		
(4ch)		+			+
(4chb)		+		(+)	+

Esimeses kolmes variandis prognoositakse kõrguse kasvu vanuse, viimases kahes kõrguse järgi. Variandis (1b) kasutatakse kalendriaasta t asemel kasvutingimuste muutumise kordaja p mõjul pikenenud või lühenenud efektiivset kasvuaastat. Variandis (4chb) tähistab märgis (+) variandis (4ch) leitud juurdekasvu CAI korrumtamist avaldisega $1 + tp/2$, seega juurdekasvu muudetakse ühtaegu kasvulae muutumise ja kasvu vahetu muutumise kaudu. Variant (1) esindab tavakasvu stabiilsetes tingimuses, variant (1b) kasvu lineaarselt pikeneva või lüheneva efektiivse kasvuaasta korral (mõlemad kasvulae fikseeritud väärtuse järgi).

Võrrandite märgistes tähistab täht b kasvu otsest muutmist, täht c muutuvat kasvulage, täht h arutamist kõrguse ja täht t vanuse või selle teisenduse järgi.

Simuleeritud kasvukõverate erisusi näitlikustatakse kõverate eneste ja ka kasvulae, käänupunkti, suurima keskmise muudu $MAI = H/t$ punkti, kõrguste suhte H_{40}/H_{100} ja H_{100}/H_{∞} väärtuste jooniste abil.

Simuleeritud kõverate lähendamine traditsioonilisel viisil

Selgitamaks muutuva kasvukiirusega andmeridade lähendamise võimalusi tavaliste kasvuvõrranditega ja kasvulae fikseeritud väärtusega lähendati simuleeritud andmeridu süsteemi rt kuuluvate funktsioonide abil. Juhul, kui mõnd kasvurida ei õnnestu sel viisil hästi lähendada, siis võib sellist ebaõnnestumist tulevikus kasutada ühena võimalikest kasvutriivi olemasolu indikaatoritest. Õnnestumise korral selgub võimalus kasutada tavamodelleerimist ka muutuva kasvukiiruse korral.

Funktsioonide süsteemi rt tähistati varem nimega rth (Nilson, 2002). Süsteemi rt üldvõrrand on (11). Võrrandit süsteemi R keskkonnas realiseeriv funktsioon on esitatud kujul (12). Simulatsiooniridade lähendamiseks kasutati rt -süsteemi 17-st võimalikust variandist lihtsustatud võrrandite kujul viit (13)–(17).

$$y = \left\{ 1 - \left[\frac{r}{\left\{ \exp\left[\left(\frac{x}{c}\right)^s\right] - 1 \right\} + r} \right]^u \right\}^v \quad (11)$$

Rt = function(x,c,r,s,t,u,v) return ((1 -
- m(r/((exp(x/c)^s - 1)^t + r)^u)^v) (12)

rt.crs = 1 - r/(e^{(x/c)^s} - 1 + r) (13)

rt.crt = 1 - [r/((e^{x/c} - 1)^t + r)] (14)

rt.cru = 1 - [r/(e^{x/c} - 1 + r)]^u (15)

rt.crv = [1 - r/(e^{x/c} - 1 + r)]^v (16)

rt.csv = [1 - 1/(e^{(x/c)^s} - 1)]^v (17)

Süsteemi parameetrite standardtähistuses sisaldub ka täht *t*. Seepärast on võrrandis (11)–(17) vanuse tähiseks täht *x*. Võrrandeid eristatakse lisades pere nimele “rt” punkti ja kasutatud parameetrite tähistestiku järjestuses.

Kasutajafunktsioon (12) lubab teha arvutusi rt-süsteemi mistahes võrrandiga. Näiteks rt.crv = rt(x,c,r,1,1,1,v), rt.crs = rt(x,c,r,s,1,1,1), rt.csv = rt(x,c,1,s,1,1,v) jne.

Võrrandite süsteem rt kuulub A. Kiviste (1988, Kiviste *et al.*, 2002) klassifikatsiooni järgi kasvufunktsioonide viiendasse gruppi ja paljusid sellesse gruppi kuuluvaid varasemaid funktsioone saab vaadelda rt-pere erijuhtudena parameetri *r* = 1 korral (Nilson, 2002). Funktsiooni rt.csv nimeks on A. Kiviste nomenklatuuris Todorović III (Todorović, 1961), võrrandid (13) ja (16) on vastavalt funktsioonide Weibull II ja Mitscherlich I parameetriga *r* täiendatud arendused. Kasvutabelite kõrguse ridu lähendasid arendused rt.crs ja rt.crv originaalidest (Weibull II ja Mitscherlich I) vastavalt ligikaudu 30% ja 10% väiksema veaga ja nende kasutamine annab originaalidest suurema kindluse traditsiooniliste lähendamisvõimaluste olemasolu või puudumise hindamiseks.

Vanuse mastaabi tunnusena kasutatakse rt-funktsioonide peres jagajat *c*, mis pöördväärtusena asendab vanuse kordajat viienda grupi funktsioonides. Mudelite parameetreid hinnati süsteemi R optimeerimisprogrammidega *optim* ja *mlinb* varem kirjeldatud viisil.

Näiva kasvukõvera tekkimist ainukordsete mõõtmisandmete vanuseridades kirjeldatakse simulatsiooni (1b) baasil. Analüüsides nt 100 a pikkust vanuserida loeme 100 a vanuse puistu kõverat algsel kujul tegeliku kasvu mudeliks. See puistu on jõudnud seisundini, kus ühele kalendriaastale vastab 100(1+100*b*) kasvuaastat. Selles kasvukiiruse seisundis on antud hetkel ka kõik nooremad puistud ja nende kõrgust vanuses *t* saame arvutada võrrandiga (18)

$$H = H_{\infty} [1 - \exp[-bt(1 + 100p)]]^c \quad (18)$$

Tulemused

Kõrguse kasvukõverate kuju muutmine erinevate mõjumehhanismide korral

Simulatsioonide tulemusi esitatakse joonistena. Joonisel 2 esitatakse kõrguse kasvukõveraid kõrguse kasvulae 15, 25 ja 35 m korral erinevate mõjuvariantide järgi eelades, kasvutingimused paranesid iga-aastaselt 0,5% võrra algväärtusest. Niisugune paranemine on vaid pisut suurem T. Oja (1998) maksimumprognoosist ja valiti nii suurena selleks, et kasvukõverate kuju erinevused oleksid visuaalselt paremini tajutavad.

Jooniste 2 ja 3 legendis on kasutatud võrrandite tähised. Kõverad 1 ja 1b on arvutatud võrrandiga (1). Kõverad (3ct), (4ch) ja (4chb) on leitud vastavalt naturaalse vanuse *t* või muutunud kõrguse *H* järgi arvutatud aastaste juurdekasvude *CAI* tõusva summana üle puistu kalendaarse vanuse. Horisontaalsed punktiirsirged *H*_∞ 15, 25 ja 35 m tähistavad kõveraviisikute algkasvulae *H*_∞ väärtusi, samadest punktidest algavad peaaegu sirged kaldkõverad tähistavad vanusega muutuva kasvulae *H*_{∞,t} väärtusi. Joonise raamjoon kõrgusel 40 m esindab männikute arvatavat liigiomase kõrguse kasvulae väärtust.

Jooniselt 2 näeme, et kasvutingimuste paranemise mõjul kasvulae suurenemisega kaasnev kasvukõvera muutus avaldub kõige selgemini algkasvulae 15 m kor-

Joonis 2. Männikute modelleeritud kasvukõverad iga-aastase kasvutingimuste paranemise korral 0,005 algväärtusest ($0,5\% \text{ a}^{-1}$).

Figure 2. Results of simulation in the case of improving growth potency by $0,5\% \text{ yr}^{-1}$ of its initial value.

Joonis 3. Männikute modelleeritud kasvukõverad aastase kasvutingimuste halvenemise korral 0,002 algväärtusest ($-0,2\% \text{ a}^{-1}$).

Figure 3. Results of simulation in the case of decreasing growth potency by $-0,2\% \text{ yr}^{-1}$ of its initial value.

ral, kuna see väärtus on kõige kaugemal kasvulae suurenemist tõkestavast liigioma-sest kasvulaest.

Tähistus (kõverate märgised) on joonisel 3 nagu joonisel 2. Muutuva kasvulaega simulatsioonides 4ch, 3ct ja 4chb lõpetati kasv, kui kõrgus saavutas kahaneva kasvulae väärtuse. Tegelikult tähendaks selline olukord puistu üsna järsu lagunemise algust. Joonistelt 2 ja 3 jääb mulje, et muutes puistu kasvukiirust muutuva kasvulae ja kõrguse seose kaudu (kõverad 4ch ja 4chb), on puistu kasvukõverate kuju üsna sarnane stabiilse kasvu kõvera kujule. See lubab eeldada, et neid kõveraid saab ligikaudselt modelleerida ka võrrandiga (1) ja fikseeritud kasvulaega.

Puistu vanusele tuginevad võrrandid ei sisalda põhjuslikkuse elementi ilmutatud kujul. Põhjuslikkus on neis varjatud raskesti tõlgendatavate avaldiste taha. Ilmutatud kujul avaldub puistu kõrguse kasvu sõltuvus kõrguse väärtusest ja tema kasvulaest võrrandites $CAI = f(H_{\infty}, H)$, võr-

randid (3ct) ja (4ch). Kasvukiiruse muutumise erinevate mudelite kajastumist diferentsiaalvõrrandite kujul iseloomustavad joonised 4 ja 5.

Joonistel kujutatakse simulatsioonide tulemusi kõrguse hetkjuurdekasvu CAI sõltuvusena kõrgusest enesest ja ajas muutuvas kasvulaest kujul $CAI = f(H_{\infty}, t, H)$ või stabiilset kasvulaest $CAI = f(H_{\infty}, H)$. Tähistus (kõverate märgised) on nagu joonisel 2.

Joonistel 4 ja 5 avalduvad erinevate toimetemehhanismide tagajärjel tekkinud kasvukõvera kuju muutused ilmekamalt kui joonistel 2 ja 3. Kõige silmatorkavamad on muutused puistute kasvu simuleerimise korral kõrguse enese ja kasvulae järgi kõveratel (4ch) ja (4chb). See vähendab jooniste 2 ja 3 visuaalse hinnanguga tekkinud optimismi nende simulatsioonide tulemuste lähendamise osas kasutades võrrandi (1) tüüpi funktsioone ja fikseeritud kasvulae. Kõvera diferentsiaalvõrrand on integraal-sest tundlikum kuju iseloomustaja.

Joonis 4. Simulatsioonide tulemused diferentsiaalvõrrandite kujul kasvutingimuste paranemise korral 0,005 algväärtusest ($0,5\%a^{-1}$).

Figure 4. Results of simulation in the case of improving growth potency $0,5\%yr^{-1}$ of initial value in the form of differential equation.

Joonis 5. Simulatsioonide tulemused diferentsiaalvõrrandite kujul halvenevate ($-0,2\%a^{-1}$) kasvutingimuste korral.

Figure 5. Results of simulation in the case of decreasing growth potency $-0,2\%yr^{-1}$ in the form of differential equation.

Joonis 6 iseloomustab kasvukõverate muutumist kõverate karakteristikute kaudu.

Ülal on kõrguse ja kasvulae suhe 100a vanuses (osajoonis A) ja H_{50}/H_{100} (B) kasvulae funktsioonina, all käänupunkti (C) ja kõrguse keskmise muudu MAI maksimumi (D) koordinaadid vanuse ja juurdekasvu tasandil. Baasvarianti (1) tähistab täidetud ruut katkendlikul horisontaaljoonel. Punktiparvedele vastava kasvulae väärtust saab ülemises reas lugeda x-teljelt variandi (1) kohalt ja alumises reas tuletada juurdekasvu gradatsioonist. Rasvased märgid tähistavad kiirenevat ($0,5\% a^{-1}$) ja õrnad aeglustuvat ($-0,2\% a^{-1}$) kasvu.

Kasvukõverate kumerus suureneb aeglustuva kasvu ja kahaneva kasvulae korral ning väheneb kiireneva kasvu ja kasvava kasvulae korral (ülemised osajoonised). Fikseeritud kasvulaega variandis (1b) jõuab kõrgus kasvulaele lähemale kiireneva kasvu korral (A). Pildid on ootusekohased.

Näiva kasvukõvera tekkimine ainukordsete mõõtmisandmete vanuseridades

Joonisel 7 on kujutatud muutuva kasvupotentsiaaliga puistute vanuseraast leitud kõrguse näiva kasvukõvera (b, näiv: 1-120 aastaste puistute hetkkõrgus 120 a pikkuses vanuseraas) moondu mine hüpoteetilise tegeliku (b, tegelik) suhtes kasvukiiruse aastase muutumise erinevate kordajate p ja kasvulae $H_{\infty,0}$ väärtuste 15, 25 ja 35 m korral mudeli (1b) järgi. Joonisel kujutatakse hetkel 120 a vanuse puistu oletatavat kõrguse kasvu möödunud 120 a jooksul võrrandi (1b) järgi (pidev kõver) ja 120 a jooksul ühtmoodi muutunud kasvutingimustes, kuid hetkel erineva vanusega, puistute kõrgust (katkendkõver). Eeldatakse, et kasvulagi H_{∞} on muutumatu ja vanuse kalendaarsele aastale vastab lineaarselt pikenev efektiivne kasvuaasta. Märgatav moonutus avaldub isegi nii väikese muutumise juures nagu $0,1\% a^{-1}$. Kasvutingimuste muutumisel $0,5\% a^{-1}$ ja $-0,2\% a^{-1}$ on erinevused üllatavalt suured.

Joonis 6. Simulatsioonide tulemused simuleeritud kõverate karakteristikute kujul.

Figure 6. Results of simulation in the form of characteristics of the simulated curves.

Joonis 7. Simuleeritud (“tegelikud” muutuva kasvu) kasvukõverad, stabiilse kasvu kasvukõverad ja muutuva kasvuga puistute ainukordsete mõõtmiste järgi tekkiv kasvu näiv pilt.

Figure 7. Simulated (“real” changing) growth curves, not changing growth curves and apparent ones estimated on the base of unique height measurements of the stands with changing growth.

Tegeliku ja näiva kõvera suhte c_H vanuses t suvalise pikkusega T vanuseraas saame arvutada võrrandiga (19)

$$c_H = \{1 - \exp[-bt(1 + tp)]\}^c \{1 - \exp[-bt(1 + tp)]\}^{-c} \quad (19)$$

Korrutades väärtusi näivas kõveras suhtega c_H saame tegeliku kõvera hinnangu ja jagades tegelikku kõverat sama suhtega saame näiva kõvera hinnangu. Selleks on vaja teada kasvu muutumise kordaja p väärtust. Teiste kasutatud simulatsioonide korral nii ladusat teisendamise võimalust ei ole. Küll aga saab analoogilist teisendust teha lähendvõrrandite abil, mis kirjeldavad simulatsiooni tulemusi nii tegeliku kui näiva kasvu kohta.

Joonis 8. Simuleeritud kasvukõverate tavalähendite suhtelised jääkhälbed $RMSE/H_\infty$ võrranditega (13)–(17) simulatsiooni varianditi kasvutingimuste paranemise $0,5\% a^{-1}$ (rasvased tähised) või halvenemise $-0,2\% a^{-1}$ (õrnad tähised). Varjutatud ringis on mittelineaarse protseduuri väärlahend. Tähised on horisontaalselt hajutatud ülekattumise vältimiseks.

Figure 8. Relative residual errors $RMSE/H_\infty$ of the conventional approximation of simulated growth curves with equations (13)–(17) by the variants of simulation. In the shadowed circle is a failed nonlinear estimation. The signs, thick for improving ($0.5\% yr^{-1}$) and thin for decreasing growth potency ($-0.2\% yr^{-1}$), are jittered horizontally to avoid overlapping.

Simuleeritud kasvukõverate lähendamise traditsioonilisel viisil

Eesmärgiga testida simuleeritud kasvukõverate lähendamisvõimalust traditsiooniliste kasvuvõrranditega kasutades kasvulae fikseeritud väärtust lähendati kõiki simuleeritud kasvukõveraid võrrandite (13) – (16) abil. Joonisel 8 on lähendite jääkhälbed ($RMSE$) väljendatud suhtena $RMSE/H_\infty$.

Funktsioonidega $rt.crv$, $rt.csv$ ja $rt.crs$ sai kasvutingimuste paranemise tõttu moonunenud kasvukõveraid lähendada enamasti suhtelise lähendusveaga suurusjärgus kuni $0,1\%$. Funktsiooni $rt.cru$ lähendid olid teistest halvemad variantides argumentiga t , kuid teistega ligikaudu võrdväärsed variantides argumentiga H . Halveneva kasvupotentsiaali korral küündis lähendusviga

Joonis 9. Kasvulae H_∞ fikseeritud väärtuse hinnangud tavalähendites simuleeritud kasvukõverate simulatsiooni varianditi lähendamisvõrrandite (13)–(17) ja simulatsioonides kasvulae algväärtuste 15 m ja 35 m puhul. Tähised on nagu joonisel 8.

Figure 9. Estimates of the asymptote H_∞ in the conventional approximations of simulated growth curves with equations (13)–(17) with the initial value of asymptote in the simulations 15 m and 35 m . Notations like in the figure 8.

kuni väärtuseni 0,5% v.a funktsioon $rt.crs$ variantidega 4ch ja 4chb, kus jääkhälve oli ligi 3%. Funktsiooni $rt.csv$ suur viga variandis 4chb on mittelineaarse väärlähendi tagajärg. Funktsioon $rt.crt$ osutus üldiselt sobimatuks, seda isegi moonutusteta kasvu, variandi 1, korral. Kasvutingimuste halvenemise tõttu moondunud kasvukõvera ei lähendanud hästi ükski kasutatud funktsioonidest, kui kasvu prognoositi kõrguse enese järgi. Suurimad on seal jääkhälbed variantide (4ch) ja (4chb) osas, kus ka funktsioon $rt.crs$ osutus praktiliselt sobimatuks.

Segunenud tähiste kuuluvust algkasvulae 15 m või 35 m tähiste hulka variantides 4ch ja 4chb aitab koos tähiste rasvasusega eristada nende paiknemine algkasvulae joonest ülal- või allpool (joonis 9). Kolme esimese variandi kasvulae väärtuse hinnangud funktsioonidega crs , cru , crv ja csv korral on suhteliselt lähedased, viimase kahe variandi (4ch ja 4chb) osas on lahknevused suured väikese algkasvulae ja paranivate kasvutingimuste ning suure algkasvulae ja halvenivate kasvutingimuste korral. Hinnangud funktsiooniga crt olid teistest järsult erinevad. Joonis ilmestab kasvulae hinnangu sõltuvust simuleeritud kõverate tavalähendamisel kasutatud kasvufunktsioonist.

Arutelu

Kasvutingimuste muutumise kandumist kõrguse kasvukõvera kuju muutumisse simuleeriti kolme peamise mehhanismi vahendusel:

- kasvuaasta efektiivse pikkuse muutumine,
- kasvulae väärtuse muutumine,
- otsene kasvukiiruse muutumine.

Tõenäoliselt ei toimi ükski neist mehhanismidest ehedalt vaid kombinatsioonis teistega. Milline võib olla erinevate mehhanismide osatähtsus ühel või teisel juhul, jääb käesolevas kirjutises lahtiseks. Võib ainult püstitada hüpoteese.

Kõrgusekasvu lagi näib sõltuvat eel-

kõige juurtootumise tingimustest. Eesti männikute kõrgusekasvu lagi võib ligikaudu samades ilmastikutingimustes erinevatel muldadel varieeruda vahemikus paarist meetrist neljakümneni. Mulla omaduste paranemise või halvenemise korral võib eeldada, et võrrandid (3ct), (4ch) ja (4chb) võivad olulisel määral peegeldada kõrgusekasvu tegelikku muutumist. Lahtiseks jääb küsimus vanuse (3ct) või kõrguse (4ch, 4chb) eelistamisest argumentina lisaks muutuval kasvulaele.

Juhul, kui juurtootumise tingimused ei muutu, kuid muutub nt ainult vegetatsiooniperioodi pikkus, siis peaks enim sobima võrrandiga (1b) saadavad tulemused. Siiski tuleb arvestada, et kasvuperioodi ja talvitumise perioodi pikkuse suhte ja soodsuse astme muutumine võib muuta ka mulla bioloogilise potentsiaali ja kõrguse kasvulae väärtust. Arvatavasti mudeli (1b) kõrgusekasvu muutmise skeem looduses eeldal kuju ei avaldu. Kõige tõenäolisem on mudeli (1b) domineeriv osa puistutes, millest kasvulae algväärtus on lähedane liigiomase kasvulae väärtusele.

Kõige enam erinevad tavakasvust tulemused, mis saadi seades kõrguse kasvu otsesõltuvusse saavutatud kõrgusest ja kasvulaest – võrrandid (4ch) ja (4chb). Neis simulatsioonides kasutati tavakasvu diferentsiaalvõrrandite kordajaid. Joonistelt 4 ja 5 näeme, et kõrgusekasvu sõltuvus kõrgusest enesest ja tema kasvulaest kujunes neis simulatsioonides märkimisväärselt erinevaks tavakasvu omast. Küsimus sellest, kuivõrd nimetatud asjaolu võiks muuta simulatsioonide üldist pilti, jääb siinkohal lahtiseks.

Võrrandiga (4ch) simuleeritud kasvu korral eeldati, et kasvu kogu kiirenemine tuleneb saavutatud kõrguse ja muutuva kasvulae erinevusest. Selline eeldus ei pruugi olla väär, kuid on siiski mõnevõrra kaheldav. Eelduse kasuks räägib stabiilse kasvu bioloogias tavaks saanud arusaam tunnuse ja tema asümptoodi juhtrollist kasvukiiruse kujunemisele. See roll ei pruugi päris samal viisil avalduda muutu-

vate kasvutingimustega muutuva kasvulae puhul.

Simulatsioon võrrandiga (3b) vanuse ja muutva kasvulae funktsioonina võiks tegelikku kasvu muutmist peegeldada ainult siis, kui kasvutingimuste kogu efekt realiseerub antud vanuse ja kasvulae väärtuse kaudu, kuid ei ole sõltuv kõrguse saavutatud väärtusest.

Kõigi viie simulatsiooniskeemi kehtivustingimused looduses jäävad probleemalisteks, kuid võib siiski oletada, et kõigis neis, või vähemalt mõnes neist, ühel või teisel määral peegeldub kasvutingimuste muutumise tegelik mõju kõrguse ja sellega seonduva mahu kasvukõvera kujule.

Simuleeritud kasvukõverate lähendamistulemused võrranditega (13), (16) ja (17) näitasid, et mõõdukalt muutunud kasvukõveraid saab praktikale vajaliku täpsusega lähendada ka traditsiooniliste fikseeritud kasvulae väärtust sisaldavate mudelitega. Sel juhul tuleb aga kõverate tõlgendamisel arvestada, et kasvukõvera karakteristikud kehtivad muutuvate kasvutingimuste uudsel foonil. Looduses vanade mudelite järgi sujuvalt muutuvaks peetav kasvulae väärtus realiseerub uutes mudelites kasvulae uue stabiilse lõppväärtusena koos teiste kasvuparameetrite muutunud väärtustega.

Kui nt suurel alal suhteliselt stabiilselt toimuvaid muutusi lugeda fooniks ja sellel foonil muutunud kasvukõveraid lugeda normiks ning seniste kasvufunktsioonide hulgas leidub kõveratele häid lähendajaid, siis vajatakse kasvukõverate modelleerimise lõppfaasis vähe muutusi. Küll aga on olulised muutused vajalikud andmehõive, valimite kujundamise, eeltöötlemise ja tõlgendamise faasis. Kasvukõvera tõlgendamine eeldab muutuvas kasvutingimustes koos puistu vanusega kalendriaasta vahendusel ka "kasvuaasta efektiivse pikkuse" arvestamist ja on märgatavalt keerukam tõlgendamisest stabiilsete kasvutingimuste foonil.

Kasvutingimuste triivi korral on kasvu modelleerimiseks vähemalt 4 erinevat varianti:

1. Puistute mineviku kasvu rekonstruktsioon, milleks saab kasutada kas puistutes nende rajamise algusest tehtud korduvaid mõõtmisi või puuanalüüsi andmeid.

2. Erineva vanusega puistute kasvu mudel mingil fikseeritud hetkel või lühikese ajavahemiku jooksul. Selle mudeli tarvis saab kasutada erineva vanusega püsi-proovitükkidel suhteliselt lühikese ajavahemiku jooksul tehtud kordusmõõtmiste või muul viisil hinnatud juurdekasvu andmeid. Kasvu triivi korral ei kirjelda see mudel õigesti konkreetsete puistute kasvu ei minevikus ega tulevikus. Praegu 100 aastane puistu kasvas 50 a eest teisiti kui 50 aastane puistu praegu ja praegu 50 aastane puistu kasvab tulevases 50–100a vanusevahemikus teisiti kui samas vanusevahemikus kasvas praegu 100 aastane puistu.

3. Mineviku kasvu tagajärgede mudel erineva vanusega puistute hetkeseisundi staatilise pildi kujul, kus algandmeteks on kas ajutiste või alatisteks kavandatud proovitükkide ühekordsed mõõtmised, samuti metsa takseerikirjelduste kogumid metsa inventeerimise andmestikest.

4. Tulevase kasvu prognoos ühel või teisel viisil tuletatuna ja ekstrapoleerituna eelmisest mudelite kolmikust. Prognoosi protsess on kõige komplitseeritum, kui lähutada peamiselt kolmanda mudeli andmetest ja pole korrektselt võimalik ilma esimese või teise mudeli andmete täiendava kasutamisetä.

Joonis 7 näitab veelkord, et muutuvas kasvutingimustes matemaatiliselt eeldatav lahknevus staatilise ja dünaamilise andmestiku järgi saadud kasvu modelleerimise tulemustes (Nilson & Kiviste, 1984, 1986) esineb ka simulatsioonis ja on arvestatava suurusega isegi kasvutingimuste suhteliselt aeglaste muutuste korral. Seda asjaolu ei tohi puistute kasvu modelleerimisel unustada.

Järeldused

Käesolev artikkel on adresseeritud esma-
joones neile, kellel on lahendada muutuva-
test kasvutingimustest tulenevaid kasvu-
kõverate muutumisega seonduvaid proble-
eme. Kirjutis on orienteeritud problee-
mide tõstatamisele ja põgusale analüüsi-
misele mitte aga probleemide lahendamisele.

Sellegipoolest võib teha mõningaid, s. h. triviaalsetena tunduvaid, järeldusi.

1. Kasvutingimuste muutumise mõju viimisel kasvumudelitesse erinevatel viisidel saadakse mudelitega märgatavalt erineva kujuga kasvukõverad.

2. Kasvutingimuste muutumise mõju viimine mudelitesse kõrguse kasvulae muutumise kaudu on huvipakkuv võimalus. Kasutades seejuures teise argumenta-
dina kas vanust või kõrgust, saadakse erinevad tulemused.

3. Lineaarselt muutuvate kasvutingimuste tagajärjel tekkinud kasvukõveraid saab lähendada konstantse kasvulaega mudelitega traditsioonilisel viisil. Erandiks osutusid simulatsioonid halvenevates kasvutingimustes muutuva kasvulae ja saavutatud kõrguse kasutamisel argumenta-
dina. Võimalik siiski, et teadaolevate kasvufunktsioonide hulgas leidub ka viimati mainitud juhu jaoks sobivaid.

4. Muutuvates kasvutingimustes tuleb kasvumudeleid tõlgendada ja rakendada teisiti kui stabiilsetes tingimustes. See kehtib ka punkt 3 kohaselt saadud traditsiooniliste mudelite kohta.

5. Muutuvates kasvutingimustes tuleb silmas pidada ja arvestada mineviku-, oleviku- ja tulevikukasvu erinevusi.

Käesolevas artiklis selgitati männikute kõrguse kasvukõverate moonustumise mõningaid aspekte lineaarselt muutuvates kasvutingimustes erinevate mõjumehhanismide korral. Katsetatud variandid valiti küll suhteliselt tõepärastena, kuid võimalike mõjumehhanismide loend ei olnud kindlasti ammendav. Artiklis esitatud tule-

mused võivad osutuda kasulikuks neile uurijatele, kes muutuvais kasvutingimustes kujundavad või soovivad täpsustada omi lähtekohti puistute kasvu modelleerimiseks aga ka kõigile, kes muutuvais kasvutingimustes kasutavad või tõlgendavad tavapäraseid kasvumodeleid.

Tänuavaldused. Kirjutama innustas autorit prof. Andres Kiviste, kelle koostatud kasvufunktsioonide teatmikud ja varasemad teemaga haakuvad publikatsioonid olid töö koostamisel suureks abiks. Siiras tänu talle ja retsensentidele artikli vormistamisega seotud kasulike märkuste ja nõuannete eest. Uurimust toetas ETF grant 8890.

Kirjandus

- Ahas, R., Tarand, A. Meitern, H. 1998. Temporal variability of the phenological time series in Estonia. Country Case Study on Climate Change Impacts and adaptation assessments in the Republic of Estonia. Ministry of the Environment Republic of Estonia. Stockholm Environment Institute – Tallinn. Tallinn, 28–30.
- Climate change and forestry in Sweden – a literature review. 2004. Kungl. Skogs – och Lantbruksakademiens Tidskrift, 143(18). 44 pp.
- Karjalainen, T., Spiecker, H. and Laroussinie, O. (Eds.). 1999. Causes and Consequences of accelerating Tree Growth in Europe. – EFI Proceedings, 27.
- Keskkonnaministri 16. jaanuari 2009. a määrus nr 2 „Metsa korraldamise juhend“ (Instruction for forest inventory, Estonia). (In Estonian).
- Kiviste, A. 1999b. Eesti puistute kasvumudelitest. (On the growth models of Estonian stands). – Pidev metsakorraldus. EPMÜ Metsandusteaduskonna toimetised, 32, 28–36. (In Estonian).
- Kiviste, A. 1987. Puistu kõrguskasvu mudeleid. (Some growth models of stand height). – EPA teaduslike tööde kogumik, 157. Tartu, 30–43. (In Estonian).
- Kiviste, A. 1988. Mathematical functions of forest growth. Estonian Agricultural Academy, Tartu. 108 pp., Supplement. 171 pp. (In Russian).
- Kiviste, A. 1995. Equations of stand height, diameter and volume depending on stand age and site factors for Estonian state forests (on the basis of 1984–1993 forest inventory data) – EPMÜ teadus-
tööde kogumik, 181, 132–148. (In Estonian with English summary).
- Kiviste, A. 1998. Estimation of Estonian forest growth change in 1951–1994 on the basis of forest inven-

- tory data. Climate Change Studies in Estonia. Ministry of the Environment Republic of Estonia. Stockholm Environment Institute – Tallinn. Tallinn, 191–196.
- Kiviste, A. 1999a. Site index change in the 1950s–1999s according to Estonian forest inventory data. – Karjalainen, T., Spiecker, H., Laroussinie, O. (Eds.). Causes and Consequences of accelerating Tree Growth in Europe. *EFI Proceedings*, 27, 87–100.
- Kiviste, A., Álvarez Gonzáles, J.G., Rojo Alboreca, A., Ruíz Gonzáles, A.D. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. (Forest growth functions). Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Monografías INIA: Forestal No 4. Madrid. 190 p. (In Spanish).
- Kiviste, A., Korjus, H. 1998. Forest scenario modelling for optimal adaptation to possible climate change in Estonia. – Nabuurs, G.J.; Nuutinen, T.; Bartelink, H.; Korhonen, M. (Eds). Forest scenario modelling for ecosystem management at landscape level. *EFI Proceedings*, 19, 319–328.
- Koenker, R. 2011. quantreg: Quantile Regression. R package version 4.76. [WWW document]. – URL <http://CRAN.R-project.org/package=quantreg>. [Accessed March 12, 2012].
- Kull, K., Kull, O. 1989. Dynamic modelling of tree growth. Institute of Zoology and Botany. Academy of Sciences Estonian SSR. *Scripta botanica V*. Tallinn, Valgus. 232 pp. (In Russian with English summary).
- Laas, E. 1987. Dendroloogia. (Dendrology). Tallinn, Valgus. 824 pp. (In Estonian).
- Mathiesen, A. 1928. Metsaboniteerimine kuivendatud soodel. (Forest site-indexing on drained swamps). – Eesti metsanduse aastaraamat III. 86–110. Bonitierung auf trockengelegten Moorböden. Résumé, 109–110. (In Estonian with German summary).
- Nilson, A. 2002. A family of asymptotic functions for forest models. – *Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused*, 37, 113–128
- Nilson, A., Kiviste A. 1984. Männikute “kasvukäigu” mudel tüpiseerimata kasvutingimuste järgi. (Pine stands “growth” model by non-typified growth conditions). – EPA teaduslike tööde kogumik, 151, 50–59. (In Estonian with English and Russian summaries).
- Nilson, A., Kiviste A. 1986. Keskkonna muutuste kajastumine erinevate meetoditega koostatud kasvukäigumudeleis. (Reflection of environment changes in the models of forest growth). – Metsa ökosüsteemide monitooring. Teaduskonverentsi teesid. Kaunas–Akadeemia, 336–337. (In Russian).
- Oja, T. 1998. Possible changes in nutrient fluxes and availability in Estonian forests. Country Case Study on Climate Change Impacts and adaptation assessments in the Republic of Estonia. Ministry of the Environment Republic of Estonia. Stockholm Environment Institute – Tallinn. Tallinn, 57–60.
- Peschel, W. 1938. Die mathematischen Methoden zur Herleitung der Wachstumsgesetze von Baum und Bestand und die Ergebnisse ihrer Anwendung. (Mathematical methods for tree and stand growth modeling and their application). – *Tharanter Forstliches Jahrbuch*, 89, 169–247. (In German).
- R Development Core Team. 2011. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3–900051–07–0. [WWW document]. – URL <http://www.R-project.org/> [Accessed March 12, 2012].
- Saar, M., Saan, T. 1993. Puud näitavad, et kevaded on muutunud. (The trees indicate the spring has been changed). – *Eesti Loodus*, 3, 65–66. (In Estonian).
- Skovsgaard, J.P., Vanclay, J.K. 2007. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry Advance Access published October 24, 2007*. 19p.
- Todorović, D. 1961. Zakonitosti organskog rastenja i njegova analitička predstava. (Laws of organic growth in analytic form). Doktorska disertacija. (Doctoral thesis). Glasnik šumarskog fakulteta. Br. 21. Beograd. 206 p. (In Serbian).
- Weber, R. 1891. Lehrbuch der Forsteinrichtung mit besonderer Berücksichtigung der Zuwachsgesetze der Waldbäume. (Textbook of forest inventory with overview of the growth of forest trees). Springer-Verlag, 440 pp. (In German).
- Нильсон А. М., Кивисте А. К. 1986. Отражение изменения окружающей среды в моделях хода роста леса, составленных разными методами. (Reflection of environment changes in the models of forest growth). Мониторинг лесных экосистем. Тез. докл. научн. конф. Каунас, 336–337. (In Russian).

Simulated change of stand height curves as the result of linear change of growth conditions in the case of Scotch Pine stands

Artur Nilson

Summary

The height growth curves of Pine (*Pinus sylvestris* L.) stands were simulated for stands with initial height asymptote H_∞ 15 m, 25 m and 35 m and with linear change p of the potency of growth conditions $0.5\% \text{ yr}^{-1}$, $0.2\% \text{ yr}^{-1}$, $0.1\% \text{ yr}^{-1}$, $-0.2\% \text{ yr}^{-1}$ and with no change as the base. Different models to transmit the changing growth potential into stand growth were used: changing the efficient length of growth year replacing the stand age t with the expression $t(1 + tp)$ with fixed H_∞ in variant (eq. 1b) or calculating the current asymptote $H_{\infty,t}$ as the expression $H_\infty(1 + tp)$ corrected with eq. 7 for asymptotic approaching the species specific asymptote $H_{\infty,sp} = \sup(H_\infty)$. Current annual increment CAI in the last case was then calculated using the equations $CAI_t = f(t, H_{\infty,t})$ in variant (eq. 3ct), $CAI_t = f(H, H_{\infty,t})$ in variant (eq. 4ch) and $CAI_t = f(H, H_{\infty,t}) \cdot (1+p/2)$ in variant (eq. 4chb). The height H_t in the last 3 cases was calculated as ascending sum of CAI_t . Figures 2 and 3 of the functions $H_t = f(t, H_\infty)$ and figures 4

and 5 of the functions $CAI_t = f(H, H_\infty)$ indicate the last as more informative about the changes in the shape of curves. Some characteristics of changed growth curves are illustrated on the figure 6.

The results of approximation of simulated curves with equations (13)–(17) (with the stand age denoted there with x) indicate the possibility of their modeling using traditional functions and fixed value of height asymptote (Fig. 8). The fit was the poorest for variants 4ch and 4chb, especially using eq. (14) or eq. (15).

The difference of the apparent growth curve based on unique height measurements and the real one is illustrated with fig. 7. The function (eq. 19) for their conversation has been deduced for version 1b. The need to make distinct difference between the past, present and future growth in growth modeling is underlined with making reference to respective modeling methods.

Received March 29, 2012, revised May 8, 2012, accepted May 21, 2012