Short communication

Puistu ruumilise struktuuri arvutuslik kirjeldamine

Eneli Põldveer*, Diana Laarmann ja Henn Korjus

Põldveer, E., Laarmann, D., Korjus, H. 2022. Quantification of spatial stand structure. – Forestry Studies | Metsanduslikud Uurimused 76, 90–98, ISSN 1406-9954. Journal homepage: http://mi.emu.ee/forestry.studies

Abstract. As the focus in forestry is moving from timber production to prioritized economic benefits and better integration of ecological-social functions, practical forest management is shifting towards promoting diverse stand structures. Promoting stand structural heterogeneity requires accurate and profound evaluations of spatial stand structure that are generally not provided during conventional forest inventories. In this paper, different indices describing the heterogeneity of the stand and the spatial arrangement of trees, including their size, condition and species were assessed. Indices were applied to the inventory data collected from the Estonian Network of Forest Research Plots. The results show that the studied structural indices are useful in assessment of Estonian forest stands. The practical importance of structural indices will increase in future as there will be a need for methods for characterizing forest stand structural diversity at a large scale, for example, derived from high-resolution remote sensing data.

Key words: stand heterogeneity, structural indices, point process statistics.

Authors' address: Institute of Forestry and Engineering, Estonian University of Life Sciences, Kreutzwaldi 5, 51006 Tartu, Estonia; *e-mail: eneli.poldveer@emu.ee

Sissejuhatus

Eesti on metsavarude poolest rikas riik – metsad katavad ligikaudu poole Eesti maismaast ning metsadest rohkem kui veerandile on kehtestatud erineva tugevusega kaitserežiime (Sirkas & Valgepea, 2022). Kaitsealadel on küll oluline roll metsade bioloogilise mitmekesisuse säilitamisel, kuid bioloogilise mitmekesisuse hoidmise ja taastamisega tuleb tegeleda ka majandusmetsades väljaspool kaitsealasid. Majandusmetsade peamine eesmärk on pikka aega olnud optimaalsete kuludega puidu tootmine (Buongiorno *et al*., 1994), mistõttu metsamajanduslike tööde mõju on olnud puistutes nende struktuuri (ülesehitust) lihtsustav. Viimastel aastatel on metsanduses fookus liikunud puidutootmiselt metsade majanduslike, ökoloogiliste ning sotsiaalsete funktsioonide efektiivsemale omavahelisele integreerimisele (Huuskonen *et al*., 2021).

Erinevate metsa majandamise võtetega mõjutatakse eelkõige elusate ja surnud puude ruumilist, liigilist, vanuselist ja dimensionaalset jaotust puistus (Seidel *et al*., 2019; Juchheim, 2020). Metsade elurikkuse säilitamisel mängivad olulist rolli puistusse jäetavad struktuurielemendid, sh vanad ja surnud puud, erinevas kõdunemisastmes lamapuud, peamisest puistuelemendist selgelt erineva vanusega ja erinevat liiki puud jt, mille olemasolu ja rohkus loo-

DOI: 10.2478/fsmu-2022-0006

© 2022 by the authors. Licensee Estonian University of Life Sciences, Tartu, Estonia. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

vad sobivaid elupaiku erinevatele metsas elavatele liikidele (McElhinny *et al*., 2005; Mikoláš *et al*., 2017; Thorn *et al*., 2017). Elurikkusest sõltub omakorda metsaökosüsteemi võime säilitada häiringute korral oma struktuuri olulisemaid komponente ning tagada oluliste ökoloogiliste protsesside ja looduslike funktsioonide toimimist (Thompson *et al*., 2009). Nii võibki metsade majandamisel puistu ruumilise struktuuri mitmekesisena hoidmist pidada üheks oluliseks elurikkuse säilitamise meetmeks.

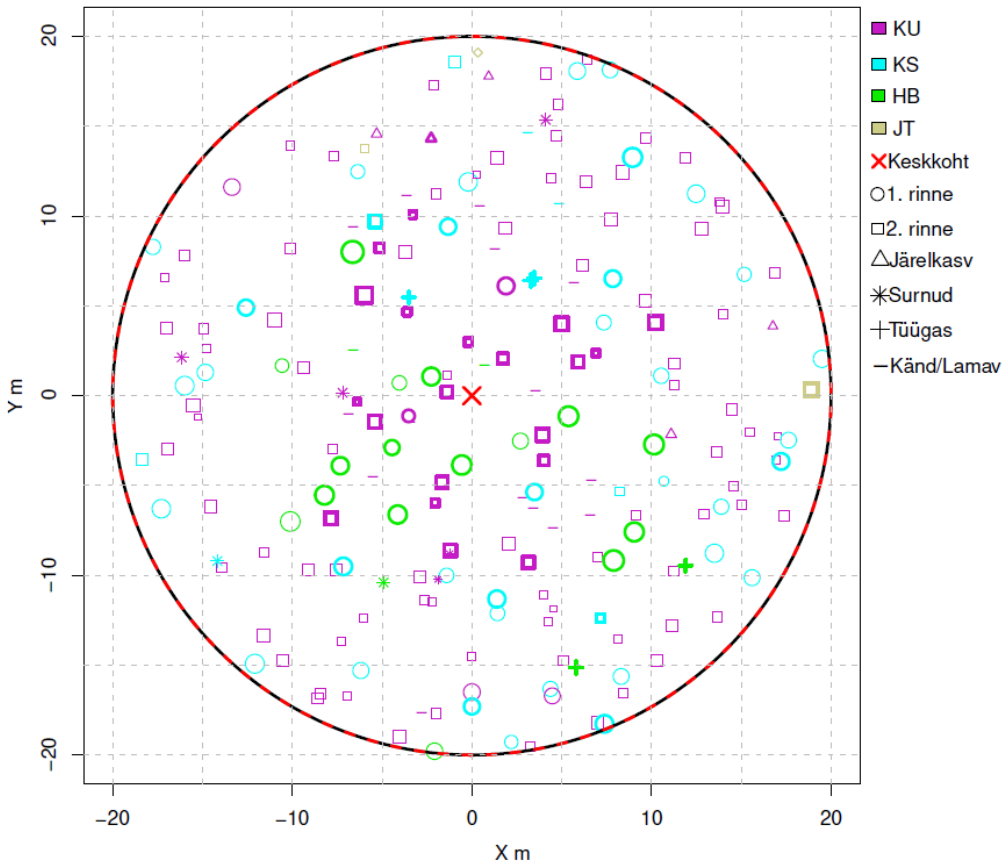
Puistu struktuuri mitmekesisuse edendamine ja mitmekesisena hoidmine eeldab, et puistu ruumilise struktuuri kohta kogutud informatsioon on piisav ja põhjalik. Metsakorralduses klassikaliselt kasutatavad takseertunnused nagu puistu koosseis, diameeter, rinnaspindala jm annavad küll kasulikku informatsiooni puistute kohta, kuid ei kirjelda puistu struktuuri piisavalt detailselt. Sarnaste tunnustega puistutes võivad olla väga erinevad puude paiknemise mustrid (Pretzsch, 1995) – näiteks ei iseloomusta puistu keskmine diameeter puude dimensioonide varieeruvust puistus, puud võivad olla nii sarnaste diameetritega kui ka väga erinevatega. Puistu struktuuri terviklikuks kirjeldamiseks ja ruumilise olemuse arvestamiseks oleks tarvis kasutada meetodeid, mis iseloomustavad puistut tervikuna (Zenner & Hibbs, 2000). Selles artiklis tutvustame kahte uuringut, mis on publitseeritud osana doktoritööst (Põldveer, 2022) ning mille käigus antakse puistu ruumilisele struktuurile erinevate indeksite abil arvulisi hinnanguid – erineva looduslikkuse tasemega puistute struktuuri uuring (Põldveer *et al*., 2020) ja puistu struktuuri mitmekesisuse uuring (Põldveer *et al*., 2021).

Materjal ja metoodika

Uuringud põhinevad Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide inventeerimisandmetel. Püsiproovitükkide võrgustik koondab endas üle tuhande proovitüki andmeid, mis paiknevad üle Eesti ja asuvad erineva vanuse, kasvukohatüübi ja majandamisrežiimiga puistutes (Kiviste *et al*., 2015). Ringikujulistel proovitükkidel raadiusega kuni 30 m on puude asukohad kaardistatud (joonis 1) ning iga viie aasta järel toimub kordusinventuur, kus mõõdetakse puude rinnasdiameeter, märgitakse üles puudel esinevad kahjustused ning mõõdetakse mudelpuude kõrgus koos võra alguse kõrgusega. Lisaks elusatele puudele inventeeritakse surnud ja lamapuud, määratakse puu suremise põhjused, hinnatakse üksikpuude elujõulisust, puistu looduslikkust jm.

Proovitükkide detailne andmestik võimaldab puistu ruumilisele struktuurile anda arvulisi hinnanguid, kasutades erinevaid struktuuriindekseid (tabel 1). Indeksid kirjeldavad puistu struktuuri heterogeensust (Zenner, 2000) ja erinevate omadustega (nt liik või suurus) puude ruumilise paiknemise mustreid puistus (Kint *et al*., 2003; Gadow *et al*., 2012).

Erineva looduslikkuse tasemega puistute struktuuri uuring (Põldveer *et al*., 2020) põhineb 212-l üle Eesti paiknevatel püsiproovitükkide andmetel. Puistu looduslikkuse hindamine koosneb kolmest komponendist: puistu loodusväärtused, kultuurilis-bioloogilised väärtused ja negatiivsed inimmõjud (Korjus *et al*., 2012). Looduslikkuse hindamisel saadud punktiskoori alusel jaotati puistud kolme klassi: majandatavad, taastuvad ja looduslikud metsad. Puistu struktuuri arvuliseks kirjeldamiseks kasutati neljal lähimal naaberpuul põhinevaid indekseid (tabel 1): liigilise segunemise, surnud puude ruumilise paiknemise, elusate ja surnud puude segunemise, diameetrite diferentseerumise ning puude ruumilise paiknemise indekseid. Erineva looduslikkuse tasemega puistute struktuuri uurimiseks ning omavaheliseks võrdlemiseks kasutati nii indeksite keskmist väärtust kui ka indeksite varieeruvust puistu tasemel. Nelja lähima naaberpuu korral on referentspuu indeksite väärtused 0; 0,25; 0,5; 0,75 või 1, kusjuures,



Joonis 1. 20-meetrise raadiusega püsiproovitüki skeem. KU – harilik kuusk (*Picea abies* (L.) H. Karst.), KS – aru- või sookask (*Betula pendula* Roth, *B. pubescens* Ehrh.), HB – harilik haab (*Populus tremula* L.), JT – teised puuliigid.

mida kõrgem on indeksi väärtus, seda sagedasem on erinevate puuliikide segunemine, surnud puude grupiline paiknemine, elusate ja surnud puude omavaheline segunemine, diameetrite diferentseerumine ning seda ebaregulaarsemad on puude ruumilise paiknemise mustrid puistus.

Puistu struktuuri mitmekesisuse uuring (Põldveer *et al.*, 2021) põhineb 852 püsiproovitükil, mis jaotati vastavalt kehtivale majandusrežiimile kolme gruppi: kaitsealused metsad, majandatavad metsad ning väga tugevate inimmõjudega karjäärimetsad, mis asuvad endises Aidu põlevkivikarjääri taasmetsastatud aladel. Igale proovitükile arvutati puistu struktuuri mitmekesisuse indeks SCI (tabel 1), mis põhineb puu asukohal ja puu suurusel puistus ning võimaldab muuhulgas hinnata metsamajandamise otsest mõju puistu struktuuri mitmekesisusele ja analüüsida, kuidas struktuuri mitmekesisus muutub sõltuvalt metsamajandamise režiimist ja kasvukohast.

Tulemused

Erineva looduslikkuse tasemega puistute struktuuri uuringust (Põldveer *et al.*, 2020) selgus, et struktuurielementide ja -mustrite mitmekesisus osutab erineva majandamisrežiimiga puistutes olulistele erinevustele, kuid erinevused sõltuvad puistu

Tabel 1. Puistu ruumilist struktuuri kirjeldavad indeksid. Tase – indeksi esmane arvutamise tase (puu tasemel, puistu tasemel). Indeksite arvutamisel proovitüki tasemel tuleb korrigeerida servaefekti. Detailsema ülevaate saamiseks vaata Põldveer (2022).

Indeksi nimetus	Tähis	Viide	Tase	Valem
Liigiline segunemine	M_i	Gadow, 1993	puu	$M_i = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} v_j$, $M_i \in [0,1]$; kus: i – referentspuu; j – referentspuu naaberpuu; $v_j = \begin{cases} 1, kui\ liik\ j \neq liik\ i \\ 0, vastupidi \end{cases}$
Surnud puude ruumiline paiknemine	DM_i	Laarmann *et al.*, 2009	puu	$DM_i = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} v_j$, $DM_i \in [0,1]$; kus: i – surnud referentspuu; j – referentspuu naaberpuu; $v_j = \begin{cases} 1, kui\ naaberpuu\ j\ on\ surnud\ puu \\ 0, vastupidi \end{cases}$
Elusate ja surnud puude segunemine	D_i	Põldveer *et al.*, 2020	puu	$D_i = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} v_j$, $D_i \in [0,1]$; kus: i – elus referentspuu; j – referentspuu naaberpuu; $v_j = \begin{cases} 1, kui\ naaberpuu\ j\ on\ surnud\ puu \\ 0, vastupidi \end{cases}$
Diameetrite diferentseerumine	T_i	Gadow, 1999	puu	$T_i = 1 - \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} \frac{\min(d_i, d_j)}{max(d_i, d_j)}$, $T_i \in [0,1]$; kus: i – referentspuu; j – referentspuu naaberpuu; d – puu diameeter
Puude ruumiline paiknemine	W_i	Gadow & Hui, 2002	puu	$W_i = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} v_j$, $W_i \in [0,1]$; kus: i – referentspuu; j – referentspuu naaberpuu; a_j – naaberpuude vaheline nurk, ≤ 180°; α_o – standardnurk (360° / k + 1), 72° kui naaberpuude arv (k) on 4 (Hui & Gadow, 2002); $v_j = \begin{cases} 1, kui\ a_j < \alpha_o \\ 0, vastupidi \end{cases}$
Puistu struktuuri mitmekesisus	SCI	Zenner, 1998	puistu	$\mathrm{SCI} = \mathrm{SCI}^*/A_T$, kus: A_T – mittekattuvate kolmnurkade pindalade summa, mis arvutatakse puu x- ja y-koordinaatide järgi kasutades Delaunay triangulatsiooni protseduuri; kusjuures $\mathrm{SCI}^* = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{2} \lvert a \times b \rvert$, N – kolmnurkade arv proovitükil, $\lvert a \times b \rvert$ – vektorite AB: koordinaadid $a = (x_b - x_a, y_b - y_a, z_b - z_a)$ ja AC: koordinaadid $b = (x_c - x_a, y_c - y_a, z_c - z_a)$ absoluutväärtused.

enamuspuuliigist (tabel 2). Näiteks olid majandamata (taastuvates ja looduslikes) kuusikutes erinevad puuliigid omavahel sagedamini segunenud ning puude paiknemise mustrid ebaregulaarsemad kui majandatud puistutes, samas kui männikute puhul statistilist erinevust erineva looduslikkuse tasemega puistute vahel ei esinenud. Looduslikes männikutes paiknesid surnud puud sagedamini grupiti ning elusad ja surnud puud olid omavahel seda sagedamini segunenud, mida looduslikum on puistu. Kuusikutes aga erineva looduslikkuse taseme vahel statistilist erinevust surnud puude ruumilise paiknemise ning elusate ja surnud puude segunemise indeksite osas ei ilmnenud. Lisaks selgus, et nii kuusikutes kui ka männikutes olid naaberpuud seda sagedamini erinevate mõõtmetega, mida looduslikum on puistu, ning struktuuri mitmekesisuse säilitamise seisukohalt mängivad olulist rolli vanad jämedad puud (diameetriga üle 40 cm).

Tabel 2. Struktuuriindeksite keskmised väärtused koos usaldusvahemikega 95% usaldusnivoo korral vastavalt puistu enamuspuuliigile ja looduslikkuse tasemele. Erinevad värvid tähistavad statistiliselt olulisi erinevusi ($p < 0,05$) erineva looduslikkuse tasemega metsade vahel vastavalt Kruskal-Wallise testile. $\overline{M}$– liigilise segunemise, $\overline{DM}$ – surnud puude ruumilise paiknemise, $\overline{D}$ – elusate ja surnud puude segunemise, $\overline{T}$ – diameetrite diferentseerumise ja $\overline{W}$ – puude ruumilise paiknemise indeksid.

	Looduslikkuse tase	$\overline{M}$	$\overline{DM}$	$\overline{D}$	$\overline{T}$	$\overline{W}$
Harilik kuusk	Majandatav mets	0,17 (0,13; 0,21)	0,15 (0,11; 0,19)	0,10 (0,07; 0,12)	0,31 (0,30; 0,33)	0,47 (0,46; 0,48)
	Taastuv mets	0,28 (0,22; 0,34)	0,10 (0,06; 0,15)	0,10 (0,07; 0,13)	0,40 (0,37; 0,43)	0,49 (0,47; 0,50)
	Looduslik mets	0,35 (0,29; 0,41)	0,12 (0,06; 0,18)	0,08 (0,06; 0,11)	0,45 (0,43; 0,48)	0,49 (0,48; 0,51)
Harilik mänd	Majandatav mets	0,43 (0,39; 0,46)	0,13 (0,09; 0,16)	0,08 (0,07; 0,09)	0,36 (0,34; 0,38)	0,48 (0,47; 0,49)
	Taastuv mets	0,44 (0,41; 0,47)	0,12 (0,10; 0,15)	0,11 (0,09; 0,13)	0,41 (0,39; 0,44)	0,49 (0,48; 0,50)
	Looduslik mets	0,44 (0,37; 0,50)	0,18 (0,14; 0,22)	0,15 (0,12; 0,17)	0,44 (0,43; 0,46)	0,49 (0,48; 0,50)

Puistu struktuuri mitmekesisuse hindamisel (Põldveer *et al.*, 2021) kasutati puude asukohal ja diameetritel põhinevat mitmekesisuse indeksit SCI. Indeksi väärtus oli kõige suurem ehk puistu struktuur heterogeenseim viljakates kaitsealustes metsades, millele järgnesid viljakad majandusmetsad, väheviljakad majandusmetsad ning väheviljakad kaitsealused metsad, vaid kaks viimast gruppi ei erinenud omavahel statistiliselt oluliselt ($p = 0,32$; Kruskal-Wallise testi alusel). Indeks oli väikseim endistes karjäärides asuvates metsades (tabel 3).

Puude asukohal ja diameetritel põhineva SCI indeksi väärtus oli seda suurem, mida enam puu- ja põõsaliike puistus esineb ($p < 0,01$; Kruskal-Wallise testi alusel), toetades seisukohta, et liigiline mitmekesisus toetab struktuuri mitmekesisust. Lisaks selgus, et harvendusraiete otsene mõju puistu struktuuri mitmekesisusele on negatiivne (puistu struktuuri lihtsustatakse raiete käigus), mis on ka ootuspärane, kuid pikemas perspektiivis pole metsamajandamise käigus puistute struktuuri liigselt ühtlustatud.

Tabel 3. Struktuuri mitmekesisuse indeksi SCI keskmised väärtused koos standardhälbega (miinimum- ja maksimumväärtused kuvatud sulgudes) sõltuvalt metsatüübist (kaitsealused, majandatavad ja karjäärimetsad) ja kasvukoha headusest (viljakad ja väheviljakad kasvukohad).

	Kaitsealused metsad	Majandatavad metsad	Karjäärimetsad
Viljakad	7,42 ± 1,20 (3,16 – 10,22)	4,74 ± 1,44 (1,86 – 10,78)	–
Väheviljakad	3,85 ± 0.87 (1,99 – 5,90)	4,00 ± 1,22 (1,72 – 6,77)	2,64 ± 0,69 (1,36 – 4,15)

Arutelu ja kokkuvõte

Erineva ökoloogilise kvaliteediga puistute struktuur Eestis erineb üksteisest oluliselt nii elusate kui surnud puude paiknemise mustrite, puude liigilise segunemise, elusate puude dimensioonide varieeruvuse ning üleüldise struktuuri keerukuse aspektist. Kuigi struktuurielementide ja -mustrite mitmekesisus erineva majandamisrežiimiga puistutes osutab olulistele erinevustele, sõltuvad erinevused puistu enamuspuuliigist ja kasvukohast. Puistu struktuuri mitmekesisuse säilitamise seisukohalt mängivad olulist rolli vanad ja jämedad puud ning liikide mitmekesisus toetab puistu struktuuri mitmekesisust, sest eri mõõtmetega erinevat liiki puud ja põõsad kasutavad sageli omavahel mittekonkureerivaid asukohti ja kasvuruumi puistus.

Puistu ruumilise struktuuri uurimine ja kvantitatiivne hindamine on metsanduses oluline temaatika. Puistu ruumilist struktuuri võib tinglikult pidada ökoloogilise mitmekesisuse asendusmõõdikuks (Gadow & Hui, 2002). Klassikalise metsainventeerimise käigus puistu struktuuri mitmekesisust enamjaolt ei kirjeldata. Siim Reimandi (2019) bakalaureusetöö näitas, et naaberpuude suhetel põhinevaid struktuuriindekseid on edukalt võimalik praktikas hinnata. Seega oleks metsakorraldusandmetesse võimalik integreerida puistu ruumilist struktuuri ja sealhulgas mitmekesisuse erinevaid aspekte kirjeldavat infot, mis annaks metsaomanikele oma puistute kohta väärtuslikku lisateavet. Kuna puistu struktuuri mitmekesisuse erinevad aspektid on omavahel seotud (Pommerening & Särkkä, 2013), edendab metsamajandamise käigus kindlate struktuurielementide ja -mustrite säilitamine (näiteks liikide mitmekesisus ja omavaheline segunemine) teisi mitmekesisuse aspekte (näiteks puude diameetrite diferentseerumist).

Aina enam kogutakse puistute kohta andmeid mittekontaktsetel meetoditel (Arumäe & Lang, 2020) ning metsade kaugseire andmed on muutunud laialdaselt kättesaadavaks ja kasutatavaks (Maaamet, 2021), mistõttu on kasvanud vajadus meetodite järgi, millega suuremahulistest andmekogudest puistu struktuuri ja selle mitmekesisust hinnata. Struktuuriindekseid saab edukalt rakendada Eesti metsadest kogutud andmetel ning need on tõhusad vahendid, mille abil puistu ruumilisele struktuurile arvulisi hinnanguid anda, sh selle kohta, kui heterogeenne on puistu struktuur ja kuidas erinevat liiki, suuruse või seisundiga puud puistus paiknevad. Struktuuriindeksite abil saadavat informatsiooni saab rakendada paljudes erinevates metsanduse valdkondades, näiteks metsade ökoloogilise kvaliteedi või kasutatavate metsamajandusvõtete pikaajalise mõju jälgimiseks. Samuti on kõrge ökoloogilise kvaliteediga kaitsealuste metsade puhul võimalik indeksite väärtusvahemikke kasutada lähtealusena majandamismeetodite sobivuse hindamisel puistu struktuuri heterogeensuse säilitamiseks või suurendamiseks. Indeksite praktiline kasutamine aitaks potentsiaalselt kaasa

ka terviklikumale metsade majandamise planeerimisele, võimaldades tõsta puistute ökoloogilist kvaliteeti majandatavates metsades.

Tänusõnad. Täname Keskkonnainvesteeringute Keskust, kelle finantseerimisel on toimunud Eesti metsa kasvukäigu püsiproovitükkide võrgustikku kuuluvate proovitükkide mõõtmine.

Kasutatud kirjandus

Arumäe, T., Lang, M. 2020. Airborne laser scanning as a basis for forest mensuration. – Forestry Studies / Metsanduslikud Uurimused, 73, 136–144.

Buongiorno, J., Dahir, S., Lu, H.C., Lin, C.R. 1994. Tree size diversity and economic returns in uneven-aged forest stands. – Forest Science, 40, 83–103.

Gadow, K.v. 1993. New variables for describing stands of trees. (Zur Bestandesbeschreibung in der Forsteinrichtung). – Forst und Holz, 48(21), 602–606. (In German).

Gadow, K.v. 1999. Forest structure and diversity. (Waldstruktur und Diversität). – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 170(7), 117–122. (In German).

Gadow, K.v., Hui, G.Y. 2002. Characterising forest spatial structure and diversity. – Bjoerk, L. (ed.). Sustainable Forestry in Temperate Regions. Lund, Sweden, SUFOR, University of Lund, 20–30.

Gadow, K.v., Zhang, C.Y., Wehenkel, C., Pommerening, A., Corral-Rivas, J., Korol, M., Myklush, S., Hui, G.Y., Kiviste, A., Zhao, X.H. 2012. Forest structure and diversity. – Pukkala, T., Gadow, K.v. (eds.). Continuous Cover Forestry. Managing Forest Ecosystems. Dordrecht, Springer Netherlands, 29–83.

Hui, G.Y., Gadow, K.v. 2002. The optimum standard angle of the Winkelmass. (Das Winkelmass – Herleitung des optimalen Standardwinkels). – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 173(10), 173–177. (In German).

Huuskonen, S., Domisch, T., Finér, L., Hantula, J., Hynynen, J., Matala, J., Miina, J., Neuvonen, S., Nevalainen, S., Niemistö, P., Nikula, A., Piri, T., Siitonen, J., Smolander, A., Tonteri, T., Uotila, K., Viiri, H. 2021. What is the potential for replacing monocultures with mixed-species stands to enhance ecosystem services in boreal forests in Fennoscandia? – Forest Ecology and Management, 479, 118558. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118558.

Juchheim, J. 2020. Quantifying the impact of forest management intensity and tree species diversity on individual tree shape and three-dimensional stand structure. – Doctoral dissertation. Göttingen, Georg-August-University of Göttingen. 125 pp.

Kint, V., van Meirvenne, M., Nachtergale, L., Geudens, G., Lust, N. 2003. Spatial methods for quantifying forest stand structure development: a comparison between nearest-neighbor indices and variogram analysis. – Forest Science, 49(1), 36–49.

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.

Korjus, H., Laarmann, D., Kiviste, A. 2012. Analysis of the Estonian Forest Conservation Area Network. – Journal of Environmental Science and Engineering. B, 1(6B), 779–788.

Laarmann, D., Korjus, H., Sims, A., Stanturf, J.A., Kiviste, A., Köster, K. 2009. Analysis of forest naturalness and tree mortality patterns in Estonia. – Forest Ecology and Management, 258S, S187–S195.

Maa-amet. 2021. Altitude points for aerial laser scanning (ALS). Estonian Land Board, geoportal. [WWW document]. – URL https://geoportaal.maaamet.ee/est/Ruumiandmed/Korgusandmed/Aerolaserskaneerimise-korguspunktid-p499.html. [Accessed 21 October 2022].

McElhinny, C., Gibbons, P., Brack, C., Bauhus, J. 2005. Forest and woodland stand structural complexity: its definition and measurement. – Forest Ecology and Management, 218(1–3), 1–24.

Mikoláš, M., Svitok, M., Bollmann, K., Reif, J., Bače, R., Janda, P., Trotsiuk, V., Čada, V., Vítková, L., Teodosiu, M., Coppes, J., Schurman, J.S., Morrissey, R.C., Mrhalová, H., Svoboda, M. 2017. Mixed-severity natural disturbances promote the occurrence of an endangered umbrella species in primary forests. – Forest Ecology and Management, 405, 210–218.

Pommerening, A., Särkkä, A. 2013. What mark variograms tell about spatial plant interactions. – Ecological Modelling, 251, 64–72.

Pretzsch, H. 1995. On the effect of the spatial distribution of trees on the stand growth. (Zum Einfluss des Baumvertielungsmusters auf den Bestandszuwachs). – Allgemeine Forst- und Jagdzeitung, 166, 190–201. (In German).

Põldveer, E. 2022. Quantitative assessment of stand structural traits and health condition in hemiboreal forest ecosystems. – Doctoral thesis. Tartu, Estonian University of Life Sciences. 106 pp. Available online: https://dspace.emu.ee/handle/10492/7248.

Põldveer, E., Korjus, H., Kiviste, A., Kangur, A., Paluots, T., Laarmann, D. 2020. Assessment of spatial stand structure of hemiboreal conifer dominated forests according to different levels of naturalness. – Ecological Indicators, 110, 105944.

Põldveer, E., Potapov, A., Korjus, H., Kiviste, A., Stanturf, J.A., Arumäe, T., Kangur, A., Laarmann, D. 2021. The structural complexity index SCI is useful for quantifying structural diversity of Estonian hemiboreal forests. – Forest Ecology and Management, 490(1–3), 119093.

Reimand, S. 2019. Assessment of stand structural indices on forest permanent sample plots. – Bachelor's thesis. Tartu, Estonian University of Life Sciences. 39 pp. (In Estonian with English summary).

Seidel, D., Ehbrecht, M., Annighöfer, P. Ammer, C. 2019. From tree to stand-level structural complexity – Which properties make a forest stand complex? – Agricultural and Forest Meteorology, 278, 107699.

Sirkas, F., Valgepea, M. 2022. Yearbook Forest 2020. (Aastaraamat Mets 2020). Tallinn, Estonian Environment Agency. 322 pp. [WWW document]. – URL https://keskkonnaportaal.ee/sites/default/files/Teemad/Mets/Mets2020.pdf. [Accessed 21 October 2022].

Thompson, I., Mackey, B., McNulty, S., Mosseler, A. 2009. Forest resilience, biodiversity, and climate change. A synthesis of the biodiversity/resilience/stability relationship in forest ecosystems. Technical Series No. 43. Montreal, Secretariat of the Convention on Biological Diversity. 67 pp.

Thorn, S., Bässler, C., Svoboda, M., Müller, J. 2017. Effects of natural disturbances and salvage logging on biodiversity – Lessons from the Bohemian Forest. – Forest Ecology and Management, 388, 113–119.

Zenner, E.K. 1998. A new index for describing the structural complexity of forests. – Doctoral dissertation. Corvallis, Oregon, Oregon State University. 177 pp.

Zenner, E.K. 2000. Do residual trees increase structural complexity in Pacific Northwest coniferous forests? – Ecological Applications, 10(3), 800–810.

Zenner, E.K., Hibbs, D.E. 2000. A new method for modeling the heterogeneity of forest structure. – Forest Ecology and Management, 129, 75–87.

Quantification of spatial stand structure

Eneli Põldveer, Diana Laarmann and Henn Korjus

Summary

In this short communication, we introduce structural indices (Table 1) that have been developed over time by several scientists to quantify spatial stand structure. The indices were applied on stand data collected from the Estonian Network of Forest Research Plots and analysed in Põldveer's (2022) doctoral thesis.

Tree species composition, mean diameter, basal area and other generic variables are traditionally used during conventional forest inventories to describe forest stand structure. These variables provide useful description of a stand; however, they give no information about the structural variability in a stand. Stands with similar characteristics may have very different tree positioning patterns (Pretzsch, 1995) – for example, the mean diameter does not characterise whether trees within a stand have similar or different dimensions. The applied indices include the stand-level structural complexity index and spatially explicit tree-level indices based on the nearest neighbourhood approach, such as species mingling, deadwood mingling, deadwood distribution, diameter differentiation and uniform angle indices. The results showed that these indices are useful for characterizing Estonian hemiboreal forests. Structural indices take into account the multidimensionality of forest layout and the spatial nature of forests (Zenner & Hibbs, 2000), and assist effectively in quantifying forest stand structures.

Received May 28, 2022, revised November 11, 2022, accepted November 11, 2022