

MODELIRANJE VIŠINSKE IN DEBELINSKE RASTI DOMINANTNIH DREVES TER OCENJEVANJE INDEKSOV PRODUKCIJSKE SPOSOBNOSTI GOZDNIH RASTIŠČ MODELING HEIGHT AND DIAMETER GROWTH OF DOMINANT TREES AND ESTIMATING SITE PRODUCTIVITY INDICES

Andrej BONČINA¹, Vasilije TRIFKOVIĆ², Živa BONČINA³

(1) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, andrej.boncina@bf.uni-lj.si

(2) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, vasilije.trifkovic@bf.uni-lj.si

(3) Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, ziva.boncina@bf.uni-lj.si

IZVLEČEK

Modeli višinskega in debelinskega priraščanja dreves so pomembni za upravljanje gozdov, saj so podlaga za določanje režima redčenja, ciljnih premerov drevesnih vrst in optimalnega razmerja razvojnih faz ter ocenjevanje produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč. S podatki s stalnih vzorčnih ploskev smo za dva gozdna tipa (gradnovo bukovje na izpranih tleh in predalpsko jelovo bukovje) modelirali višinsko rast dominantnih bukev in smrek glede na njihov premer. Za obe vrsti smo ocenili rastiščni produkcijski indeks (SPI), ki je dominantna višina drevja pri prsnem premeru 45 cm. Na podlagi debelinskega priraščanja dominantnih dreves smo ocenili prehodne dobe in povprečno starost dreves glede na njihovo debelino. To so bili vhodni podatki za določitev regresijskega modela višine dominantnih dreves glede na njihovo starost. SPI je za smreko v primerjavi z bukvijo pričakovano višji, pri bukvi je vrednost SPI višja na rastišču gradnovega bukovja na izpranih tleh (28,7 m proti 27,9 m), pri smreki pa na rastišču predalpskega jelovega bukovja (31,3 m proti 29,7 m). Vrednosti rastiščnih indeksov (SI; dominantna višina drevja pri starosti 100 let) smreke na rastiščih gradnovega bukovja in predalpskega jelovega bukovja so 33,4 in 32,0, bukve pa 29,0 in 27,0. Z opisanim postopkom smo za izbrana gozdna rastiščna tipa določili indekse produkcijske sposobnosti gozdnih smreke in bukve (SI in SPI); uporabnost postopka je treba preveriti še za druge drevesne vrste in gozdne rastiščne tipe.

Ključne besede: dominantna drevesa, višinska in debelinska rast, rastiščni indeks, rastiščni produkcijski indeks, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*

ABSTRACT

Modeling the height and diameter growth of trees is an important part of forest management. Growth models provide the basis for determining the thinning regime, target tree dimensions and optimal proportions of developmental phases of forest stands. We developed individual height growth models for dominant Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in two forest types (sessile oak-European beech forests and pre-Alpine silver fir-European beech forests). Based on the models, the site productivity index (SPI), defined as the dominant tree height at a diameter of 45 cm, was determined for spruce and beech in both forest types. Based on the diameter increment of the dominant trees, the age of trees in regard to their diameter was calculated, which was the basis for Height-Age modeling. The site productivity index (SPI) of spruce in sessile oak-beech forests and pre-Alpine silver fir-European beech forests is higher than that of beech: 31.3 and 29.7 vs 28.7 and 27.9, respectively. Estimated site indices (SI; dominant tree height at the age of 100 years) in sessile oak-European beech forests and pre-Alpine silver fir-European beech forests were 33.4 and 32.0 for spruce, and 29.0 and 27.0 for beech, respectively. Using the described procedure, it is possible to determine indices of site productivity of spruce and beech (SI and SPI) in the selected forest habitat types. Testing the procedure in other forest types and for other tree species is suggested.

Key words: dominant trees, tree height growth, tree diameter growth, site index, site productivity index, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*

GDK 228+522(045)=163.6

DOI 10.20315/ASetL.125.1

Prispelo / Received: 28. 1. 2021

Sprejeto / Accepted: 20. 4. 2021



1 UVOD

1 INTRODUCTION

Raziskovanje rasti drevja je pomemben del gozdarske znanosti. Rast drevja je eden izmed ključnih procesov v gozdnih ekosistemih. Poznavanje rasti drevja je temelj za razumevanje funkcioniranja gozdnih eko-

sistemov, upravljanje gozdov in načrtovanje pa tudi za razumevanje okoljskih vplivov na razvoj gozdnih sestojev. Rast drevja je odvisna od mnogih dejavnikov, med njimi so zlasti pomembni rastiščni in sestojni dejavniki (Pretzsch, 2009). Od začetkov načrtnega gospodarjenja z gozdovi so se gozdarski strokovnjaki ukvar-

jali z zakonitostmi priraščanja drevja in ocenjevanjem produktivnosti gozdnih rastišč (Skovsgaard in Vanclay, 2008). Produktivnost gozdnih rastišč je količinska ocena rastiščnega potenciala za produkcijo lesne fitomase (Sharma, 2019).

Načini ocenjevanja produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč (PSGR) so se spreminjali (Skovsgaard in Vanclay, 2008; Sharma, 2019). Med kazalniki PSGR je uveljavljen zlasti rastiščni indeks (SI, ang. *site index*), ki je primeren predvsem za čiste in enomerne sestoje. Določen je kot dominantna višina sestoj pri referenčni starosti (pogosto 50 ali 100 let). Starost drevja je enostavneje določljiva v čistih sestojih, ki so nastali bodisi s sadnjo ali pa z naravno obnovo s kratko pomladitveno dobo, praviloma na velikih površinah. V strukturno razgibanih gozdnih sestojih, ki so nastali z zlivanjem pomladitvenih jeder z različno dolgimi pomladitvenimi dobami, je starost drevja manj primerna in zanesljiva spremenljivka za ocenjevanje produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč. Zato so za oceno priraščanja drevja v mladosti namesto fizične starosti uporabljali razvojno starost drevja (Kotar, 1984). Tako je bil rastiščni indeks za večji del gozdov prepoznan kot primeren kazalnik za ocenjevanje PSGR (Kadunc in sod., 2013). Pogosto je kot eden izmed vhodnih spremenljivk vključen v modele (simulatorje) razvoja gozdov (npr. Rosset in sod., 2013). Drugi, podoben kazalnik, ki je pogosteje omenjen v zadnjem desetletju, pa je rastiščni produkcijski indeks (SPI, ang. *site productivity index*; tudi *diametric site index* in *site form* (Beltran in sod., 2017; Molina-Valero in sod., 2019)), ki je definiran kot srednja višina vladajočih in sovladajočih dreves pri referenčnem prsnem premeru (Fu in sod., 2017). Ta indeks je uporaben v raznomernih gozdovih oziroma gozdovih, kjer je starost drevja zaradi načina obnavljanja sestojev in učinka zastrtosti manj uporabna spremenljivka za modeliranje rastiščnih indeksov (Sharma, 2019). Oba indeksa sta utemeljena na razvoju višine dominantnih dreves: SI glede na starost drevja, SPI pa glede na referenčno debelino drevja. Oba se tudi uporabljata kot vhodni spremenljivki za modeliranje razvoja gozdnih sestojev (Sharma, 2019).

Načini določanja SI so različni (Skovsgaard in Vanclay, 2008; Sharma, 2019). Prva skupina metod temelji na debelnih analizah drevja, druga na spremljanju razvoja gozdnih sestojev v daljšem časovnem obdobju, tretja skupina pa na podatkih gozdnih inventur. Nekateri različne pristope pri določanju obeh indeksov delijo na statične in dinamične (Sharma, 2019). Statični ali tudi tradicionalni načini temeljijo na referenčni starosti drevja. Na podlagi podatkov, ki so pogosto pridobljeni z debelnimi analizami ali pa na dolgoročnih raziskoval-

nih objektih, je izdelan regresijski model poteka zgornje sestojne višine glede na starost. Vrednost višine drevja pri referenčni starosti je SI sestoj na obravnavanem rastišču. Pri nas se kot referenčna vrednost pogosto uporablja starost 100 let, švicarske sestojne tablice so zasnovane na rastiščnih indeksih pri starosti 50 let. V zadnjih dveh desetletjih se zelo uveljavlja dinamični pristop (Sharma, 2019), pri katerem uporabljajo predvsem podatke periodičnih gozdnih inventur (npr. Sharma in sod., 2011); mogoče je namreč določiti modele razvoja višine in premera dominantnih dreves na podlagi podatkov zaporednih meritev v krajšem obdobju. Pri modeliranju se uporablja postopek »algebraic difference approach«, zato so modeli poimenovani s kratico ADA, dopolnjeni modeli pa z imenom GADA (»generalized algebraic difference approach«) (Bailey in Clutter, 1974; Cieszewski in Bailey, 2000). Razlogi za navdušenje in množično uporabo tega pristopa v zadnjih letih (Krumland in Eng, 2005; Sharma in sod., 2011, 2019; Sharma in Brunner 2017; Manso in sod., 2020) so predvsem v možnosti uporabe podatkov (nacionalnih) gozdnih inventur, visoki zanesljivosti napovedovanja in relativno enostavnih postopkih (Nigh, 2015).

Rastiščni produkcijski indeks (SPI) je primernejši za raznomerne in mešane gozdove. Določen je na podlagi regresijskega razvoja višine dominantnih dreves glede na njihov premer (Hdom/Ddom model). Postopki ADA in GADA se uporabljajo tudi za določanje SPI, dosedanje raziskave so spodbudne (npr. Kim in sod., 2018; Molina-Valero in sod., 2019).

V Sloveniji je prikaz raziskav PSGR najbolj celostno prikazan v poročilu ciljnega raziskovalnega projekta Ugotavljanje proizvodne sposobnosti gozdnih rastišč v Sloveniji (Kadunc in sod., 2013), prostorska predstavitev PSGR v gozdovih Slovenije pa v članku Bončine in sodelavcev (2014). V zadnjih treh desetletjih je največ terenskih raziskav potekalo pod vodstvom prof. Kotarja in dr. Kadunca (npr. Kotar, 1989; Kadunc, 2010); izvedba debelnih analiz je časovno zahtevna, ploskve za študij priraščanja dreves so bile izbrane subjektivno, praviloma na nahajališčih, ki naj bi bili »reprezentativni« primeri ohranjene gozdne združbe. Poskusov ocenjevanja SI in PSGR na podlagi drugih podatkovnih virov je bilo manj. Tako sta Bončina in Poljanec poskušala oceniti potek višine dominantnih dreves na podlagi podatkov stalnih vzorčnih ploskev (SVP), vendar je bila raziskava omejena le na en gozdni tip, postopki pa poenostavljeni (Kadunc in sod., 2013). Za ocenjevanje SI je nujno poznati starost drevja; Klopčič in Bončina (2010) sta opisala postopek cenitve starosti dreves na podlagi njihovega debelinskega priraščanja. Kot uporaben vir modeliranja zgornje sestojne višine se kažejo

periodična laserska snemanje gozdnega pokrova (npr. Socha in sod., 2017), vendar o takšnih raziskavah pri nas še ne poročajo.

Zavod za gozdove Slovenije (ZGS) vzdržuje veliko število SVP, meritve so namenjene predvsem pripravi gozdnogospodarskih načrtov, vendar jih vse pogosteje uporabljamo tudi za raziskovalne namene (npr. Klopčič in sod., 2009; Ficko in sod., 2011; Pintar in Hladnik, 2018), podobno velja za podatke nacionalne gozdne inventure (npr. Jevšenak in Skudnik, 2020). Na vzorčnih ploskvah ZGS so periodično izmerjene debeline dreves nad meritvenim pragom, na nekaterih ploskvah je izmerjena višina izbranega drevesa, ki se lahko uporabi za preverjanje tarif (Poljanec, 2010). Zanimalo nas je, ali je mogoče te podatke uporabiti za oceno obeh kazalnikov produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč (SI in SPI). Za podatkovne zbirke SVP je značilno veliko število izmerjenih premerov drevja, izmerjeno je drevje s prsim premerom ≥ 10 cm, precej manjše pa je število izmerjenih višin dreves. V teh zbirkah ni podatkov o starosti drevja, prav tako ni podatkov o periodičnih meritvah višin istih (dominantnih) dreves. Periodični podatki o višinah drevja bi namreč omogočali uporabo metod GADA, ki so priporočljive za modeliranje višinske rasti drevja in določanje rastiščnih indeksov.

Poglavitni namen naše raziskave je prikazati postopke za oceno kazalnikov produkcijske sposobnosti drevesnih vrst na izbranih rastiščih s podatki s stalnih vzorčnih ploskev. Izpeljani cilji naše raziskave so: 1) določiti regresijski model višine dominantnih dreves glede na njihov premer (Hdom/Ddom model) in s tem tudi rastiščni produkcijski indeks (SPI) drevesne vrste na analiziranem rastišču; 2) na podlagi debelinskega priraščanja dominantnega drevja oceniti starost drevja in modelirati zgornjo višino dreves glede na starost (Hdom/Starost model), kar je podlaga za določitev

rastiščnega indeksa (SI) drevesnih vrst na obravnavanem rastišču; 3) primerjati vrednosti obeh kazalnikov produkcijske sposobnosti drevesnih vrst na analiziranih rastiščih; ter 4) rezultate raziskave primerjati z rezultati raziskav produkcijske sposobnosti drevesnih vrst, ki temeljijo na debelnih analizah drevja.

2 OBJEKT RAZISKAVE

2 STUDY SITE

Raziskava je omejena na dva gozdna rastiščna tipa (GRT) (preglednica 1) in dve drevesni vrsti. Namenoma sta izbrana GRT iz različnih fitogeografskih območij in različnih višinskih vegetacijskih pasov, vsak GRT pa zavzema relativno veliko površino, kar je zagotovilo za veliko število vzorčnih ploskev. Gozdni rastiščni tip gradnovo bukovje na izpranih tleh uspeva v gričevnatem in podgorskem pasu dinarskega in preddinarskega fitogeografskega območja, njegov oznaka v gozdarskem informacijskem sistemu je GRT 554. Predalpsko jelovo bukovje pa porašča gorski in zgornjegorski pas predalpskega in alpskega fitogeografskega območja, njegova oznaka pa je GRT 643. V nadaljevanju ju poenostavljeno imenujemo gradnovo bukovje in predalpsko jelovo bukovje.

3 METODE

3 METHODS

3.1 Izbor in število ploskev

3.1 Selection and number of plots

Za raziskavo smo uporabili podatkovne zbirke SVP Zavoda za gozdove Slovenije za obdobje pred letom 2014, da smo se izognili velikim spremembam gozdnih sestojev zaradi ujm, ki so tega leta in pozneje prizadele gozdove. Za študij priraščanja drevja v obeh GRT smo izbrali ploskve v odsekih, v katerih je analizirani GRT zavzemal vsaj polovico gozdne površine. V vzorec je bilo skupaj izbranih 8.464 ploskev.

Preglednica 1: Osnovni podatki o analiziranih gozdnih rastiščnih tipih (povzeto po Bončina in sod., 2021)

Table 1: Basic data on forest types included in the analysis (after Bončina et al., 2021)

	Gradnovo bukovje na izpranih tleh (GRT 554)	Predalpsko jelovo bukovje (GRT 643)
Površina (ha)	56.597	41.199
Podlaga	apnenec s plitvimi nanosi pleistocenske ilovice, apnenec in laporovec	apnenec, dolomit, ponekod primes laporovca, roženca in glinavca
Tla	evtrična rjava tla	rendzina, rjava pokarbonatna tla, evtrična rjava tla
Nadmorska višina (m)	270–650	(500) 700–1500 (1560)
Vegetacijski pas	gričevnati, podgorski	gorski in zgornjegorski
Povprečna letna temperatura (°C)	7–10	4–7
Letne padavine (mm)	900–1.400	1.500–2.500 (3.000)
Lesna zaloga (m ³ /ha)	299	426
Drevesna sestava (% lesne zaloge)	bukev (42,6), smreka (18,1), graden (11,9), beli gaber (5,2), cer (4,0), druge vrste (18,2)	smreka (62,9), bukev (21,0), jelka (8,9), druge vrste (7,2)

3.2 Določitev dominantnih dreves in priprava podatkov za modeliranje

3.2 Determination of dominant trees and data preparation for modeling

Med dominantna drevesa prištevamo 100 najdebelejših dreves na hektar. Pri določitvi dominantnih dreves na SVP smo upoštevali zasnovo inventure ZGS z dvema koncentričnima vzorčnima ploskvama; na dvorski ploskvi se meri drevje, tanjše od 30 cm, na petarski pa drevje s prsnim premerom 30 cm in več. Pri izračunu hektarskih vrednosti pomeni inventarizirano drevo na ploskvi s prsnim premerom do 30 cm 50 dreves na hektar, drevo s prsnim premerom 30 cm in več pa 20 dreves na hektar, kar smo upoštevali pri določanju dominantnih dreves na vzorčni ploskvi.

Za drevesa, ki so bila pri prvi meritvi določena kot dominantna in so na ploskvi ostala tudi pri drugi meritvi, smo izračunali debelinski prirastek kot razliko

Preglednica 2: Podatki o vzorcu analiziranih smrek in bukev na rastiščih gradnovega bukovja in predalpskega jelovega bukovja

	Gradnovo bukovje	Predalpsko jelovo bukovje
Število ploskev	4.250	4.214
Število bukev za analizo debelinskega priraščanja	7.174	2.158
Število smrek za analizo debelinskega priraščanja	3.523	9.290
Število bukev za modeliranje H_{dom}/D_{dom}	1.995	470
Število smrek za modeliranje H_{dom}/D_{dom}	1.119	1.420

Preglednica 3: Primer določitve starosti in višine dominantnih bukev v gradnovem bukovju glede na njihov premer (D_{dom}). Starost je določena glede na povprečne periodične debelinske prirastke dreves po debelinskih stopnjah, H_{dom} je izračunan s Chapman-Richardsovo funkcijo (H_{dom}/D_{dom} model).

D_{dom} (cm)	Starost (leta)	H_{dom} (m) (model H_{dom}/D_{dom})
-	0,0	0,0
0	5,4	1,3
10	23,6	7,7
15	32,5	12,3
20	41,9	16,5
25	51,9	20,1
30	62,5	23,1
35	74,4	25,4
40	86,5	27,3
45	99,3	28,7
50	111,4	29,8
55	123,4	30,6
60	134,0	31,3
65	144,6	31,8
70	156,5	32,1
75	166,9	32,4
80	176,0	32,6

obeh premerov. Ti podatki so bili podlaga za določitev debelinskega priraščanja dominantnih dreves po debelinskih stopnjah. Število podatkov o debelinskem prirastku je zaradi velike površine obeh gozdnih rastiščnih tipov veliko (preglednica 2). Za obe drevesni vrsti smo izračunali povprečne periodične prirastke za debelinske stopnje (preglednica 3). Na podlagi periodičnih prirastkov so bile izračunane prehodne dobe drevja posameznih debelinskih stopenj, ki povedo, koliko traja obdobje priraščanja dreves debelinske stopnje. Te ocene so bile podlaga za določitev časovnega obdobja debelinske rasti bukve in smreke od meritvenega praga ($D_{dom} = 10$ cm) do $D_{dom} = 80$ cm. Obdobje rasti dominantnih dreves od $D_{dom} = 0$ do $D_{dom} = 10$ cm smo ocenili z linearno regresijo priraščanja tanjših dreves s premerom $D_{dom} < 20$ cm, ki smo jo ekstrapolirali za obdobje $D_{dom} = 0-10$ cm. Ko je $D_{dom} = 0$, je višina drevesa 1,3 m; obdobje rasti do višine 1,3 m

Table 2: Data on the analysed spruce and beech trees in sessile oak-beech and pre-Alpine beech-fir forests

Table 3: Example of determining the age and dominant height of beech trees in sessile oak-beech forests according to their diameter (D_{dom}). The age was calculated as the average of the periodic diameter increments of trees per 5 cm diameter classes, and H_{dom} was calculated by the Chapman-Richards function.

smo ocenili kot 30 % obdobja, ki ga drevo potrebuje od $D_{dom} = 0$ do $D_{dom} = 10$ cm.

3.3 Modeliranje višinske rasti dominantnih dreves glede na njihov premer (Hdom/Ddom model)

3.3 Modeling the height of dominant trees according to their diameter (Hdom/Ddom model)

Za izračun modelov smo uporabili programsko okolje R (Version 1.3.1073), paket "robustbase" (Maechler in sod., 2021). V raziskavo višinskega priraščanja dominantnih dreves smo vključili samo drevesa z izmerjeno višino (preglednica 2, slika 1). Za modeliranje višine dominantnih dreves smo uporabili Chapman-Richardsovo funkcijo, ki se pogosto uporablja za ponazoritev višinskega priraščanja drevja (npr. Peng, 2011). Kadar je $D_{dom} = 0$, je višina dreves 1,3 m, zato smo uporabili obliko:

$$Y = 1,3 + A(1 - e^{-kX})^p \quad \text{enačba (1),}$$

kjer so Y dominantna višina, A , k , p parametri enačbe, X pa dominantni premer. Pri pripravi podatkov za modeliranje H_{dom} smo vrednosti izmerjenih višin drevja zmanjšali za 1,3 m, pri napovedovanju vrednosti H_{dom} pa je treba vrednost 1,3 prišteti.

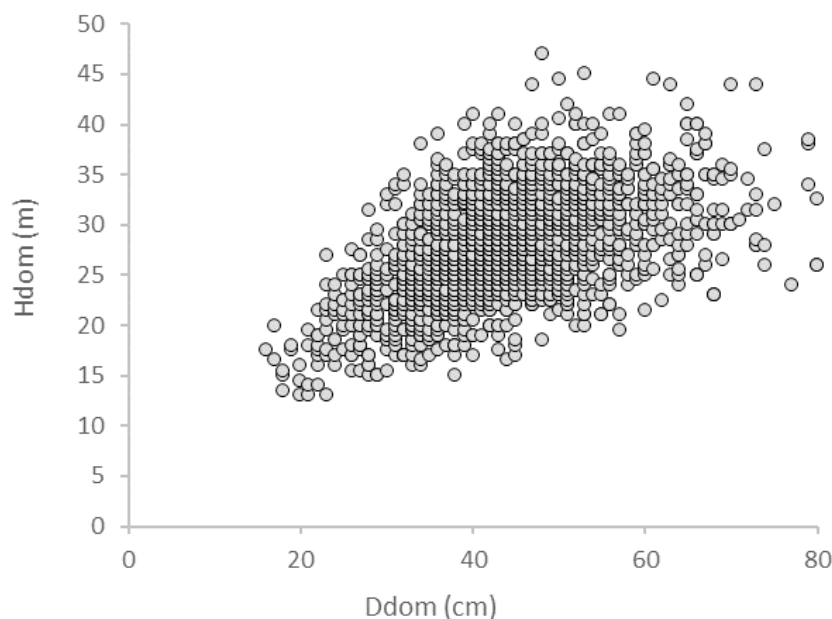
Ko smo izdelali model H_{dom}/D_{dom} za posamezno drevesno vrsto na obravnavanem rastišču, smo izračunali rastiščni produkcijski indeks (SPI), ki je vrednost

funkcije pri $D_{dom} = 45$ cm. Za ta referenčni premer smo se odločili zato, ker tudi enačbe za izračun volumnov dreves po tarifnih razredih vsebujejo faktor, ki je volumen drevesa pri prsnem premeru 45 cm (Čokl, 1980). Lahko bi izbrali tudi večji referenčni premer, ki bi bil blizu vrednostim ciljnih premerov drevja (npr. Beltran in sod., 2016).

3.4 Modeliranje višinske rasti dominantnih dreves glede na njihovo starost (Hdom/Starost model)

3.4 Modeling the height of dominant trees according to their age (Hdom/Age model)

Glede na debelinsko priraščanje dreves in oceno starosti do $D = 0$ je intervalnim vrednostim premera dominantnih dreves določena starost. Glede na model višinskega priraščanja (H_{dom}/D_{dom} model) lahko tabeliranim vrednostim premera drevja (preglednica 3) pripišemo modelirano višino dominantnega drevja. Podatke o starosti in višinah drevja smo uporabili za modeliranje višinske rasti dreves glede na njihovo starost ($H_{dom}/Starost$ model). Glede na cenotski status so dominantna drevesa vladajoča in sovladajoča, zato domnevamo, da vzorčena dominantna drevesa iz različnih sestojev ponazarjajo značilen razvoj sestoja v celotnem življenjskem obdobju na obravnavanem rastišču. Za določanje rastiščnega indeksa lahko poleg razvoja zgornje višine sestoja (100 najvišjih dreves na hektar) uporabimo tudi razvoj posameznih dominantnih dreves (npr. Sharma in sod., 2011), kar je po-



Slika 1: Primer podatkov H_{dom} in D_{dom} za bukev na rastišču gradnovega bukova

Fig. 1: H_{dom} and D_{dom} data for European beech in the sessile oak-beech forest type

membno za določanje SI posameznih drevesnih vrst v mešanih gozdovih. Uporabili smo Chapman-Richardsovo funkcijo (enačba 2) in postopke, kot so opisani v prejšnjem poglavju:

$$Y = A(1 - e^{-k \cdot t})^p \quad \text{enačba (2),}$$

kjer so Y višina dominantnih dreves, A, k, p parametri enačbe, t pa starost drevja.

3.5 Validacija

3.5 Validation

Zanesljivost modelov višinske rasti dominantnih dreves glede na njihov premer (Hdom/Ddom model) smo ocenili z ocenami napak in porazdelitvijo ostankov. Za validacijo modelov smo uporabili programsko okolje R (Version 1.3.1073), paket "modelr" (Wickham, 2020). Med različnimi ocenami napak prikazujemo štiri, in sicer: i) RMSE (*root mean square error*; koren povprečne kvadratne napake), ki pove razliko med napovedanimi in izmerjenimi podatki, ii) MAPE (*mean absolute percentage error*; povprečna napaka v odstotkih), ki je povprečna razlika (v %) med napovedano in izmerjeno vrednostjo; iii) R² (*R-square*; R kvadrat), ki kaže, kako dobro se napovedane vrednosti prilegajo dejanskim vrednostmi; iv) MAE (*mean absolute error*; povprečna absolutna napaka), ki kaže povprečno razliko med napovedano in izmerjeno vrednostjo.

Grafično smo analizirali porazdelitev ostankov glede na napovedane vrednosti (grafov ne prikazujemo); normalnost porazdelitve ostankov smo preverili s Shapiro-Wilkovim testom (Whitlock in Schluter, 2020).

Preglednica 4: Parametri Chapman-Richardsove funkcije za modele Hdom/Ddom

Parametri Chapman-Richardsove funkcije*	Gradnovo bukovje		Predalpsko jelovo bukovje	
	Bukev	Smreka	Bukev	Smreka
A	31,9488	38,8366	31,4420	40,8598
k	0,0571	0,03600	0,0634	0,0416
p	1,9320	1,41874	2,8054	1,8569
Ocena skladnosti modela				
RMSE	4,3328	3,7836	5,0020	4,6407
MAPE	0,1340	0,1106	0,1727	0,1281
R ²	0,3082	0,5632	0,2906	0,4492
MAE	3,4205	2,9572	3,9126	3,5394
Test normalnosti				
Shapiro-Wilkov test (p)	0,000	0,026	0,025	0,000

*Vsi parametri (A, k, p) so statistični značilni (stopnja tveganja za vse: $p < 0,001$; le vrednost parametra p za bukev na rastišču predalpskega jelovega bukovja je $p < 0,05$).

Izračun modela višinske rasti je izpeljan iz povprečnih starostih drevja po debelinskih stopnjah na podlagi debelinskega prirastka dominantnih dreves (preglednica 3). R² kaže prilagajanje krivulje Hdom/Starost podatkom, ki so povprečne starosti dreves po debelinskih stopnjah, določene na podlagi debelinskega prirastka dreves, in izračunane višine dominantnih dreves na podlagi modela Hdom/Ddom.

4 REZULTATI

4 RESULTS

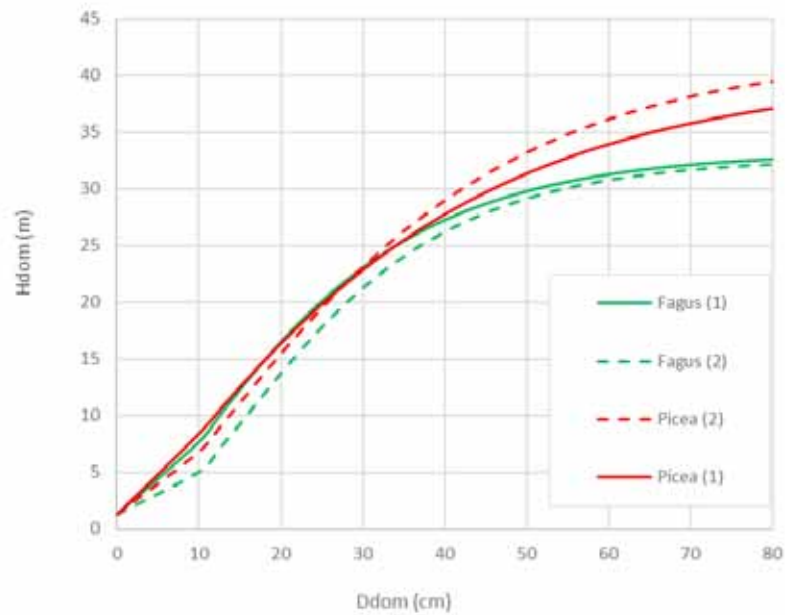
4.1 Model HDom/Ddom in ocena SPI

4.1 HDom/Ddom model and SPI estimation

Pri vseh štirih modelih (dve drevesni vrsti na dveh rastiščih) so regresijski parametri (A, k, p) statistično značilni ($p < 0,05$) (preglednica 4). Med analiziranimi primeri je opazna razlika v poteku zgornje višine dreves glede na njihov premer (slika 2). Na rastišču predalpskega jelovega bukovja je razvoj smreke in bukke v višino v mladosti upočasnjen, višine drevja pri istem premeru so manjše kot višine smrek in bukev na rastišču gradnovega bukovja. Pri debelejšem drevju pa smreke v predalpskem jelovem bukovju bolje priraščajo v višino, zato so višine dominantnih smrek pri večjih debelinah precej večje kot na rastišču gradnovega bukovja.

Glede na izbrani referenčni premer je največji produkcijski rastiščni indeks (SPI) smreke na rastišču predalpskega jelovega bukovja, sledi SPI smreke v gradnovem bukovju in potem še SPI bukke na istem rastišču, najnižji pa je SPI bukke v predalpskem jelovem bukovju (preglednica 5).

Table 4: Parameters of the Chapman-Richards function for the Hdom/Ddom models



Slika 2: Modeli Hdom/Ddom za bukev in smreko na rastiščih gradnovega bukovja (1) in predalpskega jelovega bukovja (2)

Fig. 2: Hdom/Ddom models for European beech and Norway spruce in two forest types (sessile-oak forests (1) and pre-Alpine fir-beech forests (2))

Preglednica 5: Vrednosti SPI so pri referenčnem prsnem premeru Ddom = 45 cm

Table 5: SPI values at the reference diameter

	Gradново bukovje		Predalpsko jelovo bukovje	
	Bukev	Smreka	Bukev	Smreka
Rastiščni produkcijski indeks (SPI) (m)	28,7	29,7	27,9	31,3

4.2 Modeliranje višine dominantnih dreves glede na starost (Hdom/Starost model) in ocena rastiščnega indeksa

4.2 Modeling the height of dominant trees according to their age (Hdom/age model), and estimating site index

Vsi štiri regresijski modeli Hdom/Starost se pričakovano dobro prilegajo podatkom ($R^2 > 0,99$) (preglednica 6), so pa med njimi opazne razlike. V predalpskem jelovem bukovju je višinska rast dominantnih smrek in bukev v mladosti upočasnjena, višine drevja pri isti starosti so zato precej nižje kot na rastišču gradnovega bukovja. Primerjava poteka višine dominantnih smrek na obeh rastiščih kaže pomembne razlike.

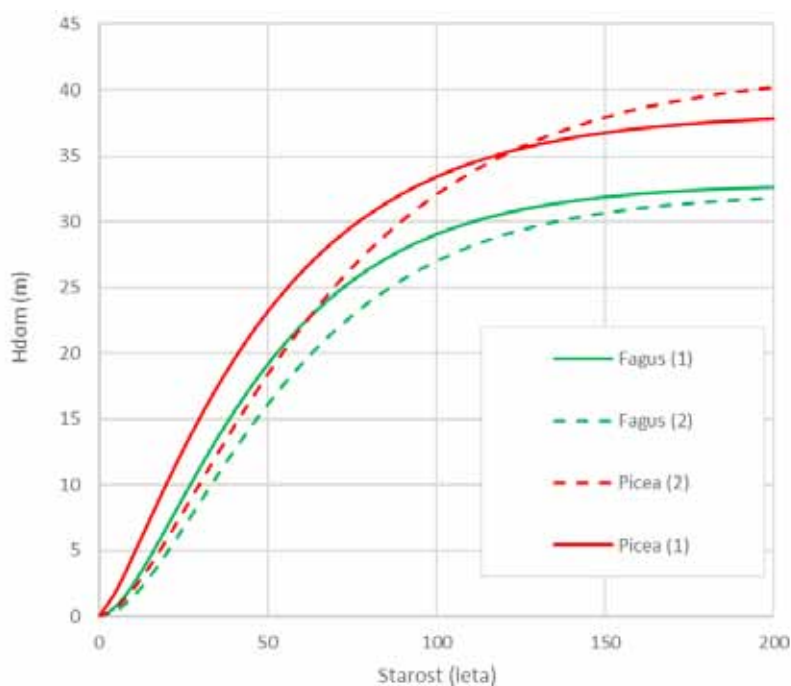
Smreka v predalpskem jelovem bukovju pri večjih starostih bolje prirašča v višino in dosega večje višine kot na rastišču gradnovega bukovja. Če bi za referenčno starost SI izbrali 150 let (slika 3), bi bil SI smreke na rastišču predalpskega jelovega bukovja višji kot v gradnovem bukovju; pri starosti 100 let pa so višine dominantnih smrek na rastišču gradnovega bukovja višje kot v predalpskem jelovem bukovju.

Rastiščna indeksa smreke sta na obeh rastiščih pričakovano višja kot rastiščna indeksa bukve. Najvišji indeks smo ugotovili za smreke na rastišču gradnovega bukovja, najnižji pa je SI bukve na rastišču predalpskega jelovega bukovja (preglednica 7).

Preglednica 6: Parametri Chapman-Richardsove funkcije za modele Hdom/Starost (vsi parametri so statistično značilni, $p < 0,001$; $R^2 > 0,99$)

Table 6: Parameters of the Chapman-Richards function for Hdom/Age models (all parameters are statistically significant, $p < 0,001$; $R^2 > 0,99$)

	Gradново bukovje		Predalpsko jelovo bukovje	
	Bukev	Smreka	Bukev	Smreka
Koeficienti Chapman-Richardsove funkcije				
A	32,8600	38,2492	32,26000	41,5400
k	0,0273	0,0235	0,02483	0,0199
p	1,8270	1,3631	2,03200	1,7620



Slika 3: Modeli Hdom/Starost za bukev in smreko na rastiščih gradnovnega bukovja (1) in predalpskega jelovega bukovja (2)

Fig. 3: Hdom/Age models for European beech and Norway spruce in two forest types (sessile oak-beech forests (1) and pre-Alpine fir-beech forests (2))

Preglednica 7: Vrednosti rastiščnih indeksov (SI) za bukev in smreko na dveh rastiščih glede na model Hdom/Starost

Table 7: Values of site productivity indices (SI) for beech and Norway spruce in two forest types according to the Hdom/Age model

	Gradnovno bukovje		Predalpsko jelovo bukovje	
	Bukev	Smreka	Bukev	Smreka
SI (m)	29,0	33,4	27,0	32,0

5 RAZPRAVA

5 DISCUSSION

S podatki s stalnih vzorčnih ploskev smo modelirali razvoj Hdom in Ddom za dve glavni drevesni vrsti gozdnih sestojev na dveh rastiščih v Sloveniji. Oba sestojna znaka sta pomembna za modeliranje razvoja gozdnih sestojev (npr. Pretzsch, 2009), saj sta sestavni del spremenljivk, s katerimi prikazujemo spremembe gozdnih sestojev. Potek Hdom in Ddom je pomemben za upravljanje gozdov. Model Hdom/Starost uporabljamo za določanje produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč, odločanje o gozdnogojitvenem ukrepanju, predvsem o ponavljanju redčenj v gozdnih sestojih oziroma določanju nujnosti redčenj (Kotar, 2005). Razvoj dominantnega premera kaže na razvoj gozdnega sestoja, saj je dominantno drevje ogrodje sestoja, izbranci, ki jih z redčenjem pospešujemo, so praviloma izbrani med dominantnim drevjem. Določanje razvojnih faz gozda je tesno povezano z dimenzijami dominantnega drevja (Bončina, 2009). Premeri dominantnega drevja so po-

membni tudi za določanje gojitvenih ciljev, saj s ciljnim premeri drevesnih vrst vse pogosteje nadomeščamo določanje proizvodnih dob drevesnih vrst.

V naši raziskavi smo modelirali razvoj višine dominantnih bukev in smreke glede na njihov prsni premer in starost, ki smo jo izpeljali iz debelinske rasti drevja. Najprej smo preverili možnosti za modeliranje Hdom/Ddom. Vrednosti Hdom pri referenčnem prsnem premeru lahko v mešanih in raznodobnih gozdovih uporabimo kot cenilko produktivnosti gozdnih rastišč za analizirano drevesno vrsto (npr. Beltran in sod., 2016; Sharma, 2019). V Sloveniji med gojitveni sistemi povsem prevladujejo različice skupinsko-postopnega gospodarjenja z naravno obnovo gozdnih sestojev (Diaci, 2006; Bončina, 2012). Parcialne pomladitvene dobe trajajo od nekaj let pa tja do 40 let ali več (Bončina, 2009). Pri skupinsko-postopnem gospodarjenju pomladitvena jedra postopno povečujemo in združujemo, tako da je starost drevja v istem sestoju kljub podobnim dimenzijam in celo enomerni zgradbi

lahko zelo različna, kar potrjujejo tudi raziskave enomernih bukovih gozdov (Kotar, 1989). Zato je fizična starost manj primeren vhod za določanje produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč (PSGR). Lahko jo nadomestimo z razvojno starostjo (Kotar, 1984, 2005), ali pa namesto referenčne starosti drevja uporabimo referenčne premere dreves. Ni povsem enotno določeno, kako izbrati referenčni premer drevesnih vrst. Nekateri omenjajo dimenzije, ki so nekaj manjše od ciljnih dimenzij (npr. Beltran in sod., 2016), vsekakor pa je treba določiti referenčne dimenzije za starejšo razvojno fazo (debeljaki oziroma drevje v zgornjem položaju, če gre za prebiralne gozdove). V tej študiji smo kot referenčni premer drevja izbrali debelino 45 cm, ker je ta referenčni premer primeren za veliko drevesnih vrst, npr. tudi za plemenite listavce. Tudi v enačbah tarif je kot ključni parameter, ki določa tarifni razred, vključen faktor k , ki je volumen drevesa pri $d = 45$ cm (Čokl, 1980). Razlike med tarifnimi razredi (10 %) so razlike v volumnu dreves pri omenjeni dimenziji.

Vrednot SPI je na istem rastišču pričakovano višja za smreko kot za bukev, pri bukvi pa je vrednost SPI pričakovano višja na rastišču gradnovega bukovja, in sicer približno za meter. Pri smreki smo pričakovali podobno, vendar SPI smreke kaže na večjo produktivnost v višjem pasu (v predalpskem jelovem bukovju). To sproža vprašanje, ali je SPI ustrezna cenilka PSGR, saj v omenjenem primeru sestojne razmere (gostota dreves) in morfološke značilnosti smreke (npr. širina krošenj) lahko pomembno vplivajo na vrednosti SPI. Gostota smrekovih sestojev v gorskem in zgornjegorskem pasu je praviloma večja (Bončina in sod., 2021), dimenzijsko razmerje drevja (H/D) pa zato večje, kar vpliva na vrednosti SPI.

Model debelinskega priraščanja dominantnega drevja je pomemben za upravljanje gozdov. Na produktivnejših rastiščih dominantna drevesa hitreje priraščajo in zato prej dosežejo ciljne dimenzije; razvoj dominantnega premera glede na starost poteka linearno do vrednosti ciljnih premerov (Ertragstafeln für die Buche in der Schweiz, 1967). Potek je odvisen od gospodarjenja, s katerim vplivamo na gostoto sestojev, odvisen je tudi od strukture in mešanosti sestojev (npr. Bielak in sod., 2014). V študiji smo se omejili na izračun srednje vrednosti debelinskega prirastka dominantnih bukev in smrek po debelinskih stopnjah. V vzorec so bila vključena dominantna drevesa vseh dimenzij (različnih razvojnih faz gozda), najmanjše število dreves je bilo med tanjšim drevjem (D_{dom} : 10–20 cm). Dominantna drevesa so del zgornjega cenotskega položaja, zato je vpliv gostote na njihovo debelinsko rast relativno manjši kot vpliv sestojne gostote na rast vseh

dreves v sestoju, je pa ta vpliv še vedno znaten (npr. Bončina in sod., 2007). Časovno obdobje rasti dreves do $D_{dom} = 10$ cm smo ocenili na podlagi rasti tankega drevja ($D_{dom} < 20$ cm), za katera smo imeli podatke o rasti. Ker so bile ploskve vir podatkov o sestojnih razmerah v različnih razvojnih fazah gozda, smo s tem nadomestili študij razvoja sestojev v celotnem življenjskem obdobju. Postopke, uporabljene v tej raziskavi, je mogoče preveriti in potem tudi izboljšati. Možnosti so predvsem v dodatnih raziskavah debelinske rasti dominantnega drevja s prsnim premerom, manjšim od meritvenega praga, ki se razvija v razmerah brez zastiranje nadstojnih dreves, kar bi prispevalo k objektivnejšemu določanju starosti drevja za obdobje od vznika do meritvenega praga. Možnosti za izboljšanje modelov H_{dom}/D_{dom} in $H_{dom}/Starost$ so v modeliranju debelinskega prirastka dominantnih dreves, ki bi nadomestilo določanje povprečnih debelinskih prirastkov (in starosti) drevja posamezne debelinske stopnje.

V naši študiji so bile ugotovljene starosti drevja do dimenzije $D_{dom} = 10$ cm: 18 let (smreka, gradnovo bukovje), 22 let (smreka, predalpsko jelovo bukovje) in 24 let (bukvev, predalpsko jelovo bukovje in gradnovo bukovje). Starost do dimenzije $D_{dom} = 50$ cm pa: 88 let (smreka, gradnovo bukovje), 111 let (bukvev, gradnovo bukovje), 113 let (smreka, predalpsko jelovo bukovje) in 127 let (bukvev, predalpsko jelovo bukovje). Ugotovljena starost drevja glede na dominantni premer drevja je podlaga za določanje razvojnih faz gozd. Ob določitvi ciljnih premerov in pomladitvenih dob bi lahko s postopkom, ki smo ga uporabili v naši raziskavi, določali optimalno razmerje razvojnih faz gozdnih sestojev na obravnavanih rastiščih, pri čemer bi morali upoštevati zmes drevesnih vrst.

Modeli H_{dom}/D_{dom} in $H_{dom}/Starost$ kažejo na velike razlike v priraščanju dveh drevesnih vrst v obravnavanih gozdnih rastiščnih tipih. Najbolj opazne razlike so v priraščanju smreke na obeh rastiščih. Smreka na rastišču gradnovega bukovja ni naravna drevesna vrsta; pogosto je bila pospeševana z umetno obnovo, lahko pa se tudi naravno pomlajuje. Njena višinska rast v »mladosti« je bistveno hitrejša kot na rastišču predalpskega jelovega bukovja, nasprotno je njena višinska rast na rastišču predalpskega jelovega bukovja tudi pri starejšem drevju, starem 100 in več let, precej večja kot na rastišču gradnovega bukovja. Slika 3 kaže na velik pomen referenčne starosti za določanje SI. Če bi uporabili starost 50 let, potem bi bil ocenjeni SI smreke na rastišču gradnovega bukovja izrazito večji kot v predalpskem jelovem bukovju. Ta razlika je precej manjša pri uveljavljeni referenčni starosti 100

Preglednica 8: Primerjava ugotovljenih vrednosti SI z vrednostmi, ugotovljenimi z debelnimi analizami (Kadunc in sod., 2013)

Drevesna vrsta, Gozdni rastiščni tip	Vrednosti SI, ugotovljene z debelnimi analizami*	Naša raziskava
Bukev, Gradnovo bukovje	31,7 (26,4–36,0)	29,0
Smreka, Gradnovo bukovje	37,7 (36,0–40,0)	33,4
Bukev, Predalpsko jelovo bukovje	26,4 (24,0–28,0)	27,0
Smreka, Predalpsko jelovo bukovje	31,4 (18,5–38,0)	32,0

*Srednje ter v oklepaju maksimalne in minimalne vrednosti SI, ugotovljene z debelnimi analizami

let, kjer je SI smreke na rastišču gradnovega bukovja za nekaj metrov višji kot v predalpskem jelovem bukovju. Če pa bila referenčna starost 150 let, bi bil tako ocenjen produkcijski potencial smreke na rastišču predalpskega jelovega bukovja večji kot na rastišču gradnovega bukovja.

Primerjava ugotovljenih vrednosti rastiščnih indeksov SI z vrednostmi SI, ko so bili ugotovljeni na »klasičen« način z debelno analizo drevja na izbranih ploskvah, značilnih za izbrano gozdno združbo (preglednica 8), kaže na ujemanje rezultatov. Vrednosti, ugotovljene v naši raziskavi so praviloma v intervalu med minimalno in maksimalno vrednostjo SI, ugotovljenega z debelnimi raziskavami. Izjema je smreka na rastišču gradnovega bukovja, kjer je vrednost, ugotovljena v naši raziskavi, nižja. Ploskve za debelne analize dreves na obravnavanem rastišču so bile izbrane subjektivno, pogosto na nahajališčih, kjer so rastiščne razmere ugodnejše od povprečnih razmer za obravnavani gozdni rastiščni tip (npr. Sharma, 2019).

Primerjava vrednosti SI in SPI kaže na delno ujemanje; za bukev so ocene produkcijskih sposobnosti pri obeh postopkih istosmerne, produkcijska sposobnost bukve je večja na rastišču gradnovega bukovja. Pri smreki pa je produkcijska sposobnost, izražena s SPI, znatno večja v predalpskem jelovem bukovju, merjeno s SI, pa je produkcijska sposobnost smreke večja v gradnovem bukovju. Indeks SPI je podobno kot vrste tarif in tarifni razredi odvisen od sestojnih razmer in produkcijske ravni. V ta rastiščni tip so uvrščeni gozdovi Jelovice, Pokljuke, Jelendola in drugih predelov (Bončina in sod., 2021), kjer je gostota sestojev praviloma večja kot na rastišču gradnovega bukovja, drevje bolj ozkokrošnjato, razmerje h/d pa večje kot v gradnovem bukovju. Na obeh rastiščih prevladujejo enomerni sestoji - bodisi malopovršinski ali velikopovršinski. Glede na primerjavo z drugimi raziskavami (npr. Kadunc in sod., 2013) in ob upoštevanju sestojnih zgradb ter vplivi na vrednosti indeksov SPI menimo, da je vsaj za obravnavane primere ocenjevanje PSGR s SI primernejše kot s SPI. Razlike med rastišči in drevesnimi vr-

Table 8: Comparison of our results with findings determined by the traditional approach (Kadunc et al., 2013)

stami, merjene z vrednostmi SPI, so za preučevane primere relativno manjše kot razlike, merjene s SI. Če bi kot referenčni premer izbrali večji premer, npr. 55 cm, bi bila razlike med analiziranimi primeri izrazitejše.

6 ZAKLJUČEK

6 CONCLUSION

Razvili smo postopek za modeliranje Hdom s podatki SVP, ki je podlaga za določitev indeksov produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč. Predstavljeni postopek je smiselno preveriti tudi za druge drevesne vrste in gozdne rastiščne tipe. Pogoj za to je zadostna količina podatkov o premerih in višinah dominantnega drevja. Pomembno je tudi, da so terenske meritve premerov in višin dreves natančne in da pri vnosu podatkov ni napak. Za sodobnejše pristope pri modeliranju Hdom in Ddom s postopki GADA je treba dopolniti zasnovo gozdnih inventur; ključno je namreč, da bi vsaj za del dominantnih dreves imeli ponovne in natančne izmere njihovih drevesnih višin.

7 POVZETEK

7 SUMMARY

Modeling the height and diameter growth of trees is an important part of forest management. Growth models provide the basis for determining the thinning regime, target tree dimensions and optimal proportions of developmental phases of forest stands. We developed individual height growth models for dominant Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) in two forest types: 1) sessile oak-European beech forests and 2) pre-Alpine silver fir-European beech forests. These forest types cover 56,600 ha and 41,200 ha of forest area, respectively. Data from permanent sampling plots of the Slovenia Forest Service were used for the analyses. More than 20 thousand dominant trees were analysed for diameter growth, and the data from five thousand trees were applied for Height/Diameter (Hdom/Ddom) modeling. Hdom/Ddom models for the two tree species and two forest types were defined by Chapman-Richards func-

tions. Based on the models, the site productivity index (SPI), defined as the dominant tree height at a diameter of 45 cm, was determined for spruce and beech in both forest types. The site productivity index (SPI) of spruce in sessile oak-beech forests and pre-Alpine silver fir-European beech forests was higher than that of beech: 31.3 and 29.7 vs 28.7 and 27.9, respectively. Based on the diameter increment of dominant trees, the age of trees in regard to their diameter was calculated for 5 cm dbh classes. Estimated average ages of dbh classes were the basis for Height-Age modeling. Estimated site indices (SI; dominant tree height at the age of 100 years) in sessile oak-beech forests and pre-Alpine silver fir-European beech forests were 33.4 and 32.0 for spruce, and 29.0 and 27.0 for beech, respectively. It is evident that the height growth of beech and spruce in sessile oak-beech forests is faster in the first decades of life span if compared to the height growth of the same tree species in pre-Alpine silver fir-European beech forests. The difference in the dynamics of height growth between the two forest types in the first half of the observed life span was expected given the significant differences in site conditions. However, in the second half of the observed period, the height growth of spruce in pre-Alpine forests is more intense than that in sub-mountain forests. At the end of the observed period, spruce reached a significantly higher tree height than that in sessile oak-beech forest. The height growth of beech in pre-Alpine forests is also faster than that in sub-mountain forests. However, the height of beech in the latter remained higher in the whole observed period. The procedure presented in our study seems to be promising for defining indices of site productivity (SPI and SI), at least in the forest types and tree species studied. To obtain better insight into the applicability of the procedure, we suggest testing it in other forest types and for other tree species.

8 ZAHVALA

8 ACKNOWLEDGEMENTS

Raziskava je nastala v okviru ciljnega raziskovalnega projekta V4-2014 Razvoj modelov za gospodarjenje z gozdovi v Sloveniji. Zavodu za gozdove Slovenije se zahvaljujemo za možnost uporabe njihovih podatkovnih virov. Zahvaljujemo se anonimnima recenzentoma za tehtne pripombe.

9 VIRI

9 REFERENCES

Bailey R.L., Clutter J.L. 1974. Base-age invariant polymorphic site curves. *Forest Science*, 20: 155–159.

- Beltran H.A., Chauchard L., Velásquez A., Sbrancia R., Pastur G.M. 2016. Diametric site index: an alternative method to estimate site quality in *Nothofagus obliqua* and *N. alpine* forests. *Cerne*, 22, 3: 345–354.
- Bielak K., Dudzińska M., Pretzsch H. 2014. Mixed stands of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) and Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) can be more productive than monocultures. Evidence from over 100 years of observation of long-term experiments. *Forest Systems*, 23, 3: 573–589.
- Bončina A. (ur.). 2012. Bukovi gozdovi v Sloveniji: ekologija in gospodarjenje. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 469 str.
- Bončina A. 2009. Urejanje gozdov - upravljanje gozdnih ekosistemov. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 359 str.
- Bončina A., Kadunc A., Poljanec A., Dakskobler I. 2014. Prostorski prikaz produkcijske sposobnosti gozdnih rastišč v Sloveniji. *Gozdarski vestnik*, 72, 4:183–197.
- Bončina A., Kadunc A., Robič D. 2007. Effects of selective thinning on growth and development of beech (*Fagus sylvatica* L.) forest stands in south-eastern Slovenia. *Annals of Forest Science*, 64: 47–57.
- Bončina A., Rozman A., Dakskobler I., Klopčič M., Babij V., Poljanec A. 2021. Gozdni rastiščni tipi Slovenije: vegetacijske, sestojne in upravljalvske značilnosti. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire, Zavod za gozdove Slovenije: 576 str.
- Cieszewski C., Bailey R.L. 2000. Generalized algebraic difference approach: theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. *Forest Science*, 46, 1: 116–126.
- Čokl M. (ur.). 1980. Gozdarski in lesnoindustrijski priročnik. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 374 str.
- Diaci J. 2006. Gojenje gozdov: pragozdovi, sestoji, zvrsti, načrtovanje, izbrana poglavja. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 348 str.
- Ertragstabelfür die Buche in der Schweiz. 1967. Birmensdorf, Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen.
- Ficko A., Poljanec A., Bončina A. 2011. Do changes in spatial distribution, structure and abundance of silver fir (*Abies alba* Mill.) indicate its decline? *Forest Ecology and Management*, 261, 4: 844–854.
- Fu L., Zhang H., Sharma R.P., Pang L., Wang G. 2017. A generalized nonlinear mixed-effects height to crown base model for Mongolian oak in northeast China. *Forest Ecology and Management*, 384: 34–43.
- Jevšenak J., Skudnik M. 2020. A random forest model for basal area increment predictions from national forest inventory data. *Forest Ecology and Management*, 479: 118601.
- Kadunc A. 2010. Kakovost, vrednostne značilnosti in produkcijska sposobnost sestojev doba in gradna v Sloveniji. *Gozdarski vestnik*, 68, 4: 217–226 & 239–240 str.
- Kadunc A., Poljanec A., Dakskobler I., Rozman A., Bončina A. 2013. Ugotavljanje proizvodne sposobnosti gozdnih rastišč v Sloveniji: poročilo o realizaciji projekta. Ljubljana, Biotehniška fakulteta, Oddelek za gozdarstvo in obnovljive gozdne vire: 42 str.
- Kim H-J., Kim H-S., Park S-I., Park H-J., Lee S-H. 2018. Development of site index curves and height-DBH growth model of *Larix kaempferi* for Deogyu Mountain in South Korea. *Forest Science and Technology*, 14, 3: 145–150.
- Klopčič M., Poljanec A., Gartner A., Bončina, A. 2009. Factors related to natural disturbances in mountain Norway spruce (*Picea abies*) forests in the Julian Alps. *Ecoscience*, 16: 48–57.

- Klopčič M., Bončina A. 2010. Značilnosti debelinskega priraščanja jelke v Sloveniji. *Gozdarski vestnik*, 68, 4: 203–216.
- Kotar M. 1984. Prirastoslovne osnove kot pripomoček pri načrtovanju gospodarjenja z gozdovi. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 24: 83–102.
- Kotar M. 1989. Prirastoslovni kazalci rasti in razvoja bukovih gozdov v Sloveniji. *Zbornik gozdarstva in lesarstva*, 33: 59–80.
- Kotar M. 2005. Zgradba, rast in donos gozda na ekoloških in fizioloških osnovah. Ljubljana, Zveza gozdarskih društev Slovenije: 500 str.
- Krumland B., Eng H. 2005. Site index systems for major young-growth forest and woodland species in Northern California. *California Department of Forestry and Fire Protection*, 4: 220 str.
- Maechler M., Rousseeuw P., Croux C., Todorov V., Ruckstuhl A., Salibián-Barrera M., Verbeke T., Koller M., Conceicao E.L., Anna di Palma M. 2021. Basic robust statistics: R package version 0.93-7. <http://robustbase.r-forge.r-project.org/> (21. 1. 2021)
- Manso R., McLean J.P., Arcangeli C., Matthews R. 2020. Dynamic top height models for several major forest tree species in Great Britain. *Forestry*, 94, 2: 181–192.
- Molina-Valero J.A., Diéguez-Aranda U., Álvarez-González J.G., Castedo-Dorado F., Pérez-Cruzado C. 2019. Assessing site form as an indicator of site quality in even-aged *Pinus radiata* D. Don stands in north-western Spain. *Annals of Forest Science*, 76: 113.
- Nigh G. 2015. Engelmann spruce site index models: a comparison of model functions and parameterizations. *Plos one*, 10: e0124079.
- Peng C. 2011. Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontario's boreal forests. *Northern Journal of Applied Forestry*, 18, 3: 87–94.
- Pintar A.M., Hladnik D. 2018. Strukturna pestrost gozdnih sestojev na Pahernikovi gozdni posesti. *Acta Silvae et Ligni*, 117: 1–16.
- Poljanec A. (ur). 2010. Navodila za snemanje na stalnih vzorčnih ploskvah. Ljubljana, ZGS Slovenije. http://www.zgs.si/fileadmin/zgs/main/img/OBVESTILA_SLO/Narocila_male_vrednosti/2013/Navodila_snemanje_staln_vzorcnih_ploskvah.pdf
- Pretzsch H. 2009. *Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model*. Berlin, Springer-Verlag: 664 str.
- Rosset C., Schütz J.-P., Lanz A., Menk J., Gollut C., Weber D. 2013. Si-WaWa: Waldwachstumssimulationsmodell der neuen Generation. *Schlussbericht: das Waldwachstum für den Praktiker leicht gemacht*. Zollikofen. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL.
- Sharma R.P., Brunner A. 2017. Modeling individual tree height growth of Norway spruce and Scots pine from national forest inventory data in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 32: 501–514.
- Sharma R.P., Brunner A., Eid T., Øyen B-H. 2011. Modelling dominant height growth from national forest inventory individual tree data with short time series and large age errors. *Forest Ecology and Management*, 262: 2162–2175.
- Sharma R.P., Stefencik I., Vacek Z., Vacek S. 2019. Generalized nonlinear mixed-effects individual tree diameter increment models for beech forests in Slovakia. *Forests*, 10, 5. doi:10.3390/f10050451.
- Sharma R.P. 2019. Site productivity and forest growth modelling strategies: monospecific versus mixed species forests. Beijing, IFRIT, CAF
- Skovsgaard J.P., Vanclay J.K. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, 81, 2: 13–31.
- Socha J., Pierzschlaski Bałazy R., Ciesielski M. 2017. Modelling top height growth and site index using repeated laser scanning. *Forest Ecology and Management*, 406: 301–317.
- Whitlock M.C., Schluter D. 2020. *The analysis of biological data*. 3rd ed. W.H. Freeman: 818 str.
- Wickham H. 2020. Modelling functions that work with the pipe. R package version 0.1.8. <https://CRAN.R-project.org/package=modelr> (26. 1. 2021).